

스위치 모드 전원장치의 전류 감지 – 제3부: 전류 감지 방법

Switch Mode Power Supply Current Sensing – Part 3: Current Sensing Methods

스위치 모드 전원장치에 일반적으로 사용되는 전류 감지 방법에는 감지 저항의 사용, MOSFET $R_{DS(ON)}$ 의 사용, 그리고 인덕터의 dc 저항(DCR)을 사용하는 세 가지 방법이 있다. 각각의 방법은 장점과 단점을 가지므로 어느 하나를 선택할 때 이를 신중히 고려해야 한다.

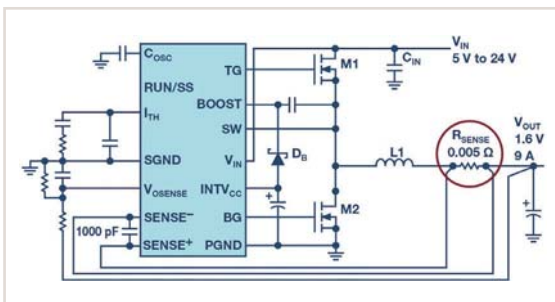
글/Henry Zhang and Kevin B. Scott, Analog Devices, Inc.

스위치 모드 전원장치에 일반적으로 사용되는 전류 감지 방법에는 감지 저항의 사용, MOSFET $R_{DS(ON)}$ 의 사용, 그리고 인덕터의 dc 저항(DCR)을 사용하는 세 가지 방법이 있다. 각각의 방법은 장점과 단점을 가지므로 어느 하나를 선택할 때 이를 신중히 고려해야 한다.

감지 저항 전류 감지

전류 감지 소자로서 감지 저항은 가장 낮은 감지 오차(통상 1%~5% 사이) 및 약 100ppm/°C(0.01%)의 매우 낮은 온도 계수를 갖는다. 또한 성능과 관련해 가장 정확한 전원을 제공하고 매우 정밀한 전원 전류 제한을

그림 1. R_{SENSE} 전류 감지



The three commonly employed current sensing methods for switch mode power supplies are: using a sense resistor, using the MOSFET $R_{DS(ON)}$, and using the dc resistance (DCR) of the inductor. Each method offers advantages and disadvantages that should be considered when selecting one method over another.

Sense Resistor Current Sensing

A sense resistor as the current sensing element results in the lowest sensing error (typically between 1% and 5%) and a very low temperature coefficient, on the order of 100 ppm/°C (0.01%). It provides the most accurate power supply in terms of performance, aids in providing a very accurate power supply current limit, and also facilitates accurate current sharing when multiple power supplies are paralleled.

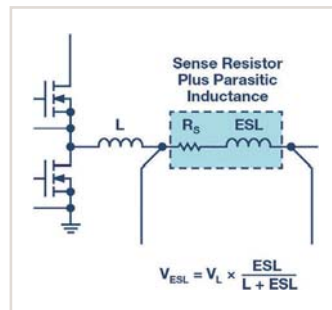
On the other hand, because a current sensing resistor is added to the power supply design, the resistor also generates additional power dissipation. Thus, the sense resistor current monitoring

제공할 수 있으며 여러 개의 전원을 병렬 연결할 경우 정확한 전류 공유를 용이하게 한다.

다른 한편으로는 전류 감지 저항이 전원 설계에 추가되므로 저항이 추가적인 전력 소모를 발생시킨다. 이에 따라 감지 저항 전류 모니터링 기법은 다른 감지 기법에 비해 전력 소모가 높아 솔루션의 전체 효율을 다소 떨어뜨린다. 또한 감지 저항의 가격이 보통 0.05~0.20 달러 사이이므로 전용 전류 감지 저항은 솔루션 비용을 증가시킨다.

감지 저항을 선택할 때 무시해서 안 되는 또 다른 파라미터는 유효 직렬 인덕턴스 또는 ESL이라 부르기도 하는 기생 인덕턴스이다. 감지 저항은 유한 인덕턴스와 직렬로 연결되는 저항으로 정확히 모델링된다.

그림 2. R_{SENSE} ESL 모델



이 인덕턴스는 선택하는 특정 감지 저항에 따라 달라진다. 금속판 저항과 같은 일부 유형의 전류 감지 저항은 ESL이 낮아 선호된다. 이에 비해 와이어 권선 감지 저항은 패키지 구조로 인해 더 높은 ESL을 가지므로 피해야 한다. 일반적으로 전류 레벨이 증가하고, 감지 신호 크기가 감소하고, 레이아웃이 부적절하면 ESL 효과가 더 뚜렷하게 나타난다. 또한 회로의 전체 인덕턴스에는 부품 리드와 다른 회로의 구성요소로 인한 기생 인덕턴스가 포함된다. 회로의 전체 인덕턴스 또한 레이아웃의 영향을 받으므로 부품 배치를 적절히 고려해야 한다. 부적절한 배치는 안정성에 영향을 미치고 기존 회로 설계 문제를 악화시킨다.

감지 저항 ESL의 영향은 미온적이거나 심각할 수 있다. ESL은 스위치 게이트 드라이버에 상당한 링잉을 발생시키고 스위치 턴온에 악영향을 미칠 수 있다. 또 전류 감지 신호에 리플을 추가하므로 그림 3에서 보듯이 예상되는 톱니 파형 대신 파형에 전압 스텝을 발생시킨

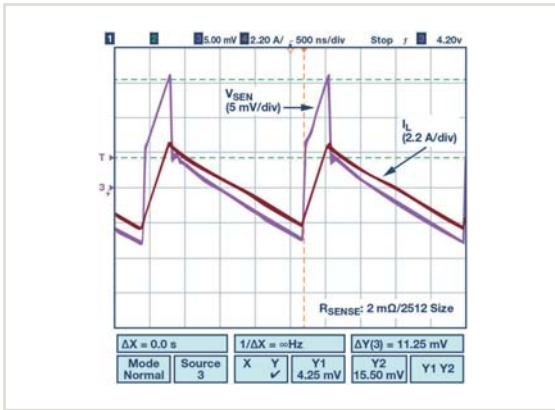
technique may have higher power dissipation compared with other sensing techniques, resulting in a slight reduction in the solution's overall efficiency. The dedicated current sensing resistor may also increase solution cost, as a sense resistor typically costs between \$0.05 and \$0.20.

Another parameter that should not be ignored when selecting a sense resistor is its parasitic inductance (also referred to as effective series inductance or ESL). The sense resistor is correctly modeled as a resistor in series with a finite inductance.

This inductance depends on the specific sense resistor chosen. Some types of current sensing resistors, such as metal plate resistors, have low ESL and are preferred. In comparison, wire wound sense resistors have higher ESL due to their package structure and should be avoided. In general, the ESL effect becomes more pronounced with increasing current levels, reduced sensing signal magnitudes, and improper layout. The circuit's total inductance also includes the parasitics inductance due to component leads and other circuit components. The circuit's total inductance is also affected by layout, so component placement must be given proper consideration; improper placement can affect stability and exacerbate existing circuit design issues.

The effects of sense resistor ESL can be mild or severe. The ESL can result in significant ringing on the switch gate driver, adversely affecting switch turn on. It also adds ripple to the current sense signal, resulting in a voltage step in the waveform, instead of the expected saw tooth waveform as shown in Figure 3. This degrades the current sensing accuracy.

To minimize resistor ESL, avoid using sense resistors that have long loops (such as wire wound resistors) or long leads (such as high profile resistors).

그림 3. R_{SENSE} ESL은 전류 감지에 악영향을 미칠 수 있다.

다. 이는 전류 감지 정확도를 떨어뜨린다.

저항 ESL을 최소화하려면 긴 루프(와이어 권선 저항 등)나 긴 리드(하이 프로파일 저항 등)를 갖는 감지 저항의 사용은 피한다. 로우 프로파일 표면 실장 디바이스가 선호된다. 이러한 예로는 플레이트 구조 SMD 사이즈 0805, 1206, 2010, 2512 등이 포함된다. 더 바람직한 선택으로는 역 기하 SMD 사이즈 0612, 1225 등이 있다.

전력 MOSFET 기반 전류 감지

단순하고 비용 효율적인 전류 감지는 MOSFET $R_{DS(ON)}$ 을 전류 감지에 사용하여 달성할 수 있다. LTC3878은 이러한 방식을 사용하는 디바이스로서 고정 온 타임, 밸리 모드 전류 감지 아키텍처를 채택한다. 여기서 상단 스위치는 고정 시간 동안 켜지고, 이 이후 하단 스위치가 켜지며, R_{DS} 전압 강하를 사용해 전류 밸리나 더 낮은 전류 제한을 검출한다.

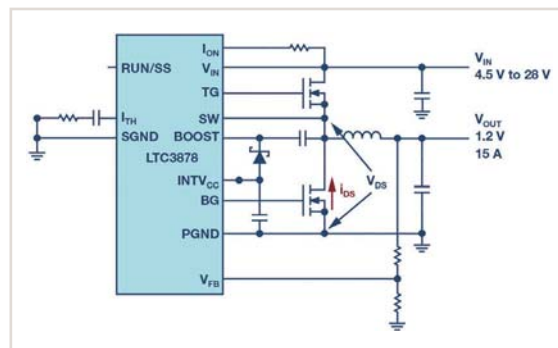
이 방법은 저렴하지만 몇 가지 단점이 있다. 첫째, 그다지 정확하지 않다. $R_{DS(ON)}$ 값의 범위에서 넓은 편차(약 33% 이상)가 있을 수 있다. 또 매우 큰 온도 계수를 가질 수 있는데, 100°C 이상에서 80%를 넘는 값은 문제의 여지가 있다. 이 밖에 외부 MOSFET을 사용할 경우 MOSFET 기생 패키징 인덕턴스를 고려해야 한다. 이 유형의 감지는 매우 높은 전류 레벨에 권장되지 않으며, 특히 우수한 위상 전류 공유가 필요한 다상 회로에

Low profile surface-mount devices are preferred; examples include the plate structure SMD sizes 0805, 1206, 2010, and 2512; even better choices include reverse geometry SMD sizes 0612 and 1225.

Power MOSFET-Based Current Sensing

Simple and cost-effective current sensing is accomplished by using the MOSFET $R_{DS(ON)}$ for current sensing. The LTC3878 is a device that uses this approach. It uses a constant on-time, valley mode current sensing architecture. Here, the top switch is on for a fixed amount of time, after which the bottom switch turns on and its R_{DS} voltage drop is used to detect the current valley or the lower current limit.

Though inexpensive, there are some drawbacks to this approach. First, it is not very accurate; there can be a wide variation (on the order of 33% or more) in the range of $R_{DS(ON)}$ values. It also can have a very large temperature coefficient; values greater than 80% over 100°C are not out of the question. In addition, if an external MOSFET is used, the MOSFET parasitic packaging inductance must be considered. This type of sensing is not recommended for very high current levels, and especially not for polyphase circuits, which require good phase current sharing.

그림 4. MOSFET $R_{DS(ON)}$ 전류 감지

서는 피해야 한다.

인덕터 DCR 전류 감지

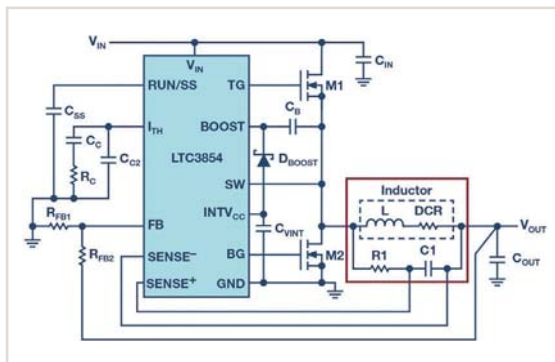
인덕터 dc 저항 전류 감지는 인덕터 권선의 기생 저항을 사용하여 전류를 측정하므로 감지 저항이 필요 없다. 따라서 부품 비용을 낮추고 전원 효율을 증가시킬 수 있다. MOSFET $R_{DS(ON)}$ 과 비교해 구리 와이어 권선의 인덕터 DCR은 온도에 따라 여전히 변화하지만 부품 간 편차가 언제나 적다. 감지 저항에 걸친 모든 강하는 출력 전압의 상당한 부분에 해당되므로 이 방법은 낮은 출력 전압 애플리케이션에 선호된다. RC 네트워크는 직렬 인덕터와 기생 저항의 조합과 병렬로 배치되고, 감지 전압은 커패시터 C1에서 측정된다(그림 5).

적절한 구성요소를 선택했다면($R1 \times C1 = L/DCR$), 커패시터 C1을 가로지르는 전압은 인덕터 전류와 비례한다. 측정 오차와 잡음을 최소화하려면 낮은 $R1$ 값이 좋다.

회로는 인덕터 전류를 직접 측정하지 않으므로 인덕터 포화를 검출할 수 없다. 따라서 철 전원 코어 인덕터와 같은 소프트 포화를 갖는 인덕터가 권장된다. 이러한 인덕터는 유사한 페라이트 코어 인덕터보다 통상적으로 높은 코어 손실을 갖는다. R_{SENSE} 방법에 비해 인덕터 DCR 감지는 감지 저항 전력 손실은 없지만 인덕터 코어 손실을 증가시킬 수 있다.

R_{SENSE} 및 DCR 감지 방법에서 모두 작은 감지 신호

그림 5. 인덕터 DCR 전류 감지



Inductor DCR Current Sensing

Inductor dc resistance current sensing uses the parasitic resistance of the inductor winding to measure current, thereby eliminating the sense resistor. This reduces component costs and increases power supply efficiency. Compared to the MOSFET $R_{DS(ON)}$, inductor DCR of the copper wire winding usually has less part-to-part variation, though it still varies with temperature. It is favored in low output voltage applications because any drop across a sense resistor represents a significant portion of the output voltage. An RC network is placed in parallel with the series inductor and parasitic resistance combination, and the sense voltage is measured across the capacitor C1 (Figure 5).

With proper component selection ($R1 \times C1 = L/DCR$), the voltage across the capacitor C1 will be proportional to the inductor current. To minimize measurement error and noise, a low $R1$ value is preferred.

Because the circuit does not directly measure inductor current, it cannot detect inductor saturation. Therefore inductors that have a soft saturation, like iron power core inductors, are recommended. These inductors typically have higher core loss than a comparable ferrite core inductor. Compared to the R_{SENSE} method, inductor DCR sensing eliminates the sensing resistor power loss but may increase the inductor core losses.

With both R_{SENSE} and DCR sensing methods, Kelvin sensing is required due to the small sense signal. It is important to keep the Kelvin sense traces (SENSE+ and SENSE- in Figure 5) away from noisy copper areas and other signal traces to minimize noise pick-up. Some devices (such as the LTC3855)

표 1. 전류 감지 방법의 장단점

감지 방법	감지 오차 @ 25°C (%)	온도 변화 (%/°C)	인덕터 포화 검출	신뢰성/보호	전류 및 열 평형	부품 비용	전원 효율
R_{SENSE}	1 or 5	~0.01	Yes	Highest	Best	R_{SENSE} (\$0.05 ~ \$0.20)	Baseline value
Inductor DCR	≥10	~0.39		Medium	Medium	n/a	Higher
MOSFET $R_{DS(ON)}$	≥30	~0.8		Lower	Worst	n/a	Higher

로 인해 켈빈 감지가 요구된다. 삽입되는 잡음을 최소화하려면 켈빈 감지 트레이스(그림 5에서 SENSE+ 및 SENSE-)를 잡음이 존재하는 구리 영역과 기타 신호 트레이스와 떨어뜨려 배치하는 것이 중요하다. 일부 디바이스(예 LTC3855)는 온도 보상되는 DCR 감지를 내장해 온도변화에 따른 정확도를 향상시킨다.

표 1은 다양한 유형의 전류 감지 방법과 각 방법이 갖는 장단점을 요약한 것이다.

표 1에 언급된 각 방법은 스위치 모드 전원장치에 추가적인 보호를 제공한다. 정확도, 효율, 열 스트레스, 보호 및 과도 성능의 트레이드오프는 모두 설계 요구사항에 따라 선택 과정에서 고려해야 한다. 전원 설계자는 전류 감지 방법과 전원 인덕터를 신중하게 선택하고 전류 감지 네트워크를 적절히 설계해야 한다. 아나로그디바이스의 LTpowerCAD 설계 툴과 LTspice® 회로 시뮬레이션 툴과 같은 컴퓨터 소프트웨어 프로그램은 최적의 결과로 설계 노력을 간소화할 수 있게 도와준다.

기타 전류 감지 방법

이 밖에 사용할 수 있는 다른 전류 감지 방법이 있다. 예를 들어 전류 감지 트랜스포머는 종종 절연 전원과 함께 절연 장벽을 가로질러 전류 신호 정보를 제공하는 데 사용된다. 이 방법은 위에서 살펴본 세 가지 방법보다 항상 더 비싸다. 이 외에 전류 감지를 통합한 게이트 드라이버(DrMOS)를 포함하는 새로운 전력 MOSFET가 몇 년 전부터 선보이고 있지만 아직 감지된 신호의 정확도와 품질과 관련해 DrMOS 감지가 얼마나 우수한지 결론을 내릴 수 있는 충분한 데이터가 없다. [SN](#)

have temperature compensated DCR sensing, which improves accuracy over temperature.

Each of the methods mentioned in **Table 1** provides added protection for switch mode power supplies. Trade-offs in accuracy, efficiency, thermal stress, protection, and transient performance all can factor into the selection process, depending on the design requirements. A power supply designer needs to carefully select the current sensing method and power inductor, and design the current sensing network properly. Computer software programs such as Analog Devices' LTpowerCAD design tool and LTspice® circuit simulation tool can be very helpful in simplifying the design effort with optimum results.

Other Current Sensing Methods

There are other current sensing methods available. For example, a current sensing transformer is often used with isolated power supplies to provide current signal information across the isolation barrier. This approach is usually more expensive than the three techniques discussed above. In addition, new power MOSFETs with integrated gate drivers (DrMOS) that also integrate current sensing have become available in recent years, but to date not enough data exists to conclude how well DrMOS sensing works in terms of accuracy and quality of the sensed signal. [SN](#)