

클램핑 및 Holder and Sampler 회로 기반 온전압 측정 및 온저항 추정

정태민¹, 김완¹, 채상헌², 박화평¹

¹한국에너지공과대학교 차세대그리드, ²한국전자기술연구원

e-mail: tmchung2002@kentech.ac.kr, a103203@kentech.ac.kr, chae@keti.re.kr, hppark@kentech.ac.kr

Clamping and Sampler Circuit-Based On-State Voltage Measurement and On-state Resistance Estimation Technique

Tae-Min Jeong¹, Wan Kim¹, Sang Heon Chae², Hwa-Pyeong Park¹

¹Energy Engineering, Korea Institute of Energy Technology, ²Korea Electronics Technology Institute

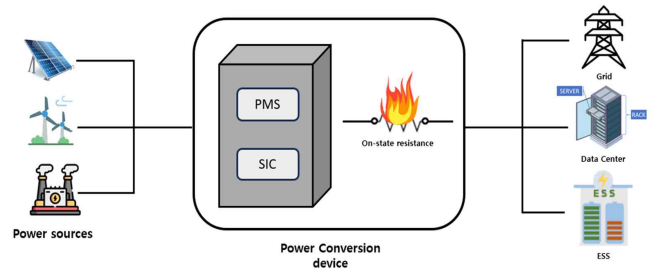
요약

스위칭 소자의 열화는 On-state 저항(Ron) 증가로 나타나며, 이는 전력 변환 시스템의 효율 및 신뢰성에 직접적인 영향을 미친다. 그러나 On 상태의 낮은 전압과 Off 상태의 고전압이 공존하는 환경에서는 정확한 전압 측정이 어렵다. 본 연구에서는 다이오드 기반 클램핑 회로와 Holder and Sampler 구조를 결합한 On-state 전압 측정 기법을 제안하였다. 제안된 회로는 Off 상태 전압을 제한하면서 On 상태 전압을 선택적으로 샘플링하여 높은 해상도의 측정을 가능하게 한다. 실험 결과, 이상적인 입력 조건에서는 높은 정확도를 보였으나, 실제 Buck Converter 환경에서는 회로 저항 및 기생 성분으로 인해 측정 오차가 발생하였다. 특히 전류 증가에 따라 절대 오차가 증가하며, 이는 Ron 추정 오차로 이어졌다. 본 연구는 제안된 측정 기법의 유효성을 검증하고, 실제 스위칭 환경에서의 오차 요인을 분석함으로써 향후 고정밀 Ron 추정을 위한 개선 방향을 제시한다.

1. 서론

스위칭 소자는 스위칭 주파수, 접합 온도, 인가 전압 및 전류 스트레스와 같은 다양한 동작 조건에 의해 점진적인 열화(degradation)가 발생한다. 이러한 열화 현상은 주로 소자의 내부 물리적 특성 변화를 초래하며, 그 대표적인 지표 중 하나가 On-state 저항(Ron)의 증가이다^{[1]-[4]}. Ron의 증가는 단순한 전기적 특성 변화에 그치지 않고, 전도 손실(conduction loss)의 증가뿐만 아니라 스위칭 시 발생하는 손실(switching loss)을 더욱 악화시키는 요인으로 작용한다. 결과적으로 이러한 손실 증가는 소자의 발열을 가속화시키고, 장기적으로는 열 폭주(thermal runaway) 및 시스템 고장으로 이어질 수 있다. 따라서 스위칭 소자의 열화 상태를 조기에 감지하고, 이를 기반으로 실시간 상태 진단을 수행하는 기술은 전력 변환 시스템의 안정성 및 신뢰성을 확보하는 데 있어 매우 중요한 요소로 간주된다.

특히 Ron은 소자의 열화 상태를 직접적으로 반영하는 대표적인 상태 변수로, 이를 정밀하게 추정할 수 있다면 스위칭 소자의 상태를 효과적으로 모니터링할 수 있다^{[1]-[2]}. Ron을 추정하기 위해서는 스위칭 소자의 On-state 전압과 전류를 정확



[그림 1] 스위치 노화에 따른 화재 및 사고 발생.

하게 측정하는 것이 필수적이다^[5]. 그러나 전력 변환 장치에서는 수백 V 이상의 높은 전압이 인가되는 환경에서 동작하기 때문에, 이러한 환경에서도 안전하고 정확한 전압 측정이 가능한 센싱 기법이 요구된다.

문제는 스위칭 소자의 동작 특성상 On 상태와 Off 상태 간의 전압 차이가 매우 크다는 점이다. On 상태에서는 수백 mV에서 수 V 수준의 비교적 작은 전압이 나타나는 반면, Off 상태에서는 입력 전압이 그대로 출력단에 인가되어 수백 V 이상의 높은 전압이 측정단에 전달된다. 이러한 큰 동적 범위를 가지는 신호를 동일한 측정 경로에서 처리할 경우, 측정 회로의 해상도(resolution)가 제한되어 실제로 관심 대상인 On 상태 전압을 정밀하게 측정하기 어렵다. 또한 Off 상태에서의 높은 전압은 센서 및 측정 회로의 손상을 유발할 수 있어, 이를 효과적으로 억제할 수 있는 보호 기법이 반드시 필요하다.

이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 다이오드를 이용한 전압 클램핑(clamping) 방식이 널리 연구되어 왔다^{[6]-[9]}. 클램핑 회로는 Off 상태에서 발생하는 높은 전압을 일정 수준 이하로 제한함으로써 측정 회로를 보호하는 동시에, On 상태의 미세한 전압 변화를 보다 높은 해상도로 측정할 수 있도록 한다. 특히 다이오드 및 제너 다이오드를 이용한 클램핑 구조는 비교적 간단한 회로 구성으로 구현이 가능하며, 높은 신뢰성과 빠른 응답 특성을 제공하기 때문에 다양한 전력 변환 응용에서 활용되고 있다^{[7]-[9]}.

본 연구에서는 이러한 배경을 바탕으로, 스위칭 소자의 On-state 전압을 정밀하게 측정하기 위한 클램핑 기반 센싱 기법을 제안하고, Holder and Sampler 회로를 제안하여 측정 단계에서 On 상태의 전압 추출하여 측정할 수 있는 회로를 제안한다. 이러한 회로를 기반으로 앞서 언급한 해상도 문제를 완벽하게 해결하고 다양한 측정 상황에 대해 측정정확도를 향상 시키는 것을 목표로 한다.

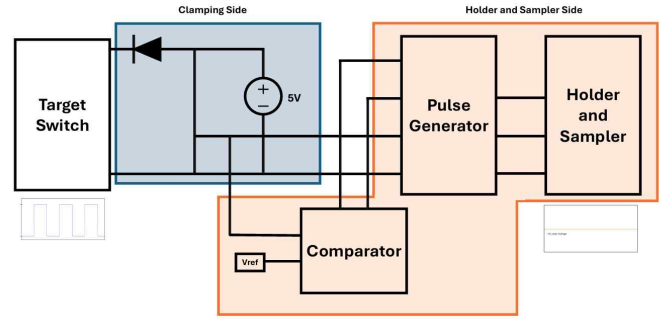
2. 본론

그림 2는 본 연구에서 제안하는 측정 회로를 나타낸다. 제안된 측정 회로는 크게 클램핑 회로와 Holder 및 Sampler로 구성된다. 이 중 클램핑 회로는 다이오드와 기준 전압원(reference voltage source)의 조합으로 이루어지며, 스위칭 소자의 Off 상태에서 발생하는 높은 입력 전압으로부터 측정 회로를 보호하는 역할을 수행한다.

클램핑 회로의 동작은 입력 전압(V_{in})과 다이오드의 순방향 전압 강하(V_f) 및 전압원(V_s)의 크기에 의해 결정된다. 입력 전압에 대해 $V_{in}+V_f$ 가 전압원(V_s)보다 큰 경우, 다이오드가 도통하면서 출력 전압은 V_s 로 제한된다. 이는 Off 상태에서 수백 V 수준의 높은 전압이 인가되더라도, 측정 회로의 출력이 기준 전압 수준으로 클램핑되어 회로를 보호함을 의미한다. V_s 를 조절함으로써 클램핑 전압을 결정할 수 있다. 해당 연구에서는 V_s 를 5V로 세팅하여 클램핑 전압은 5V로 나타난다.

반대로 $V_{in}+V_f < V_s$ 인 경우에는 다이오드가 도통하지 않으며, 출력 전압은 입력 전압과 다이오드 순방향 전압의 합에 의해 결정된다. 이 경우 출력 전압은 $V_{in}+V_f$ 로 표현되며, 이는 On 상태에서의 수백 mV~수 V 수준의 낮은 전압이 그대로 측정 회로에 반영됨을 의미한다. 따라서 제안된 클램핑 회로는 Off 상태에서는 높은 전압을 효과적으로 제한하면서도, On 상태에서는 소자의 미세한 전압 변화를 유지하여 측정할 수 있도록 한다.

Holder and Sampler는 클램핑 회로를 통해 입력된 사각파 형태의 신호로부터 스위치의 On 상태 전압만을 추출하기



[그림 2] 제안 회로 구성(Clamping side and Holder&Sampler side).

위한 구조를 가진다. 해당 시스템은 크게 비교기(Comparator), Pulse Generator, 그리고 Holder and Sampler로 구성된다.

먼저 비교기에서는 설정된 기준 전압을 기준으로 입력 신호를 판별하여, 기준 전압보다 높은 경우 High 신호를, 낮은 경우 Low 신호를 출력한다. 스위칭 소자의 동작 특성상 Off 상태에서는 높은 전압이 입력되므로 비교기 출력은 High가 되며, On 상태에서는 낮은 전압이 입력되어 Low 신호가 출력된다. 이를 통해 스위치의 동작 상태를 전압 레벨 기반으로 구분할 수 있다.

비교기의 출력 신호는 클램핑 회로의 출력과 함께 Pulse Generator로 전달되며, 내부 논리 회로를 통해 스위치가 Off 상태에서 On 상태로 전이되는 순간을 검출한다. 이때 Pulse Generator는 해당 전이 시점에 동기화된 짧은 펄스를 생성한다.

Holder and Sampler는 이 펄스를 트리거 신호로 사용하여, 펄스가 인가되는 순간의 클램핑 회로 출력 전압을 샘플링하고 이를 유지(hold)한다. 이후 스위치가 On 상태에서 Off 상태로 전환되는 동안에도 해당 전압을 유지하다가 출력함으로써, 결과적으로 On 상태에서의 전압 정보를 지속적으로 출력할 수 있다. 즉, On 상태에서 측정된 전압을 다음 스위칭 주기까지 유지함으로써, Off 상태 구간에서도 On 전압을 안정적으로 관측할 수 있는 구조를 형성한다.

이와 같은 동작을 통해 최종 측정에서는 스위칭 주기 동안 반복적으로 On 상태 전압만을 추출할 수 있으며, 넓은 동적 범위를 갖는 입력 신호 환경에서도 높은 해상도의 전압 측정이 가능해진다. 또한 Holder and Sampler 구조는 스위칭 주기마다 동기적으로 동작하므로, 실시간으로 연속적인 On-state 전압 추적이 가능하며, 이는 Ron 기반 상태 진단의 정확도를 향상시키는 데 기여한다.

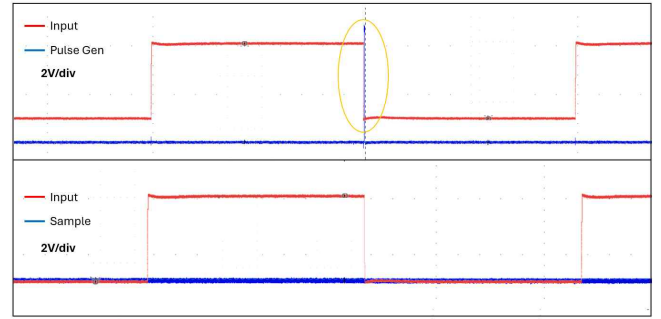
본 연구에서는 Buck Converter 내부에서 동작하는 GaN MOSFET를 대상으로 전압 및 전류 측정 실험을 수행하였다. 이를 통해 제안된 전압 측정 회로의 동작을 검증하고, 측정된 전압의 정확도 및 이를 기반으로 추정된 Ron 값을 제시함으로써 회

로의 성능을 정량적으로 평가하고자 하였다. 특히 실제 스위칭 환경에서 발생하는 측정 오차의 원인을 분석하고, 해당 오차가 Ron 추정에 미치는 영향을 함께 고찰하였다.

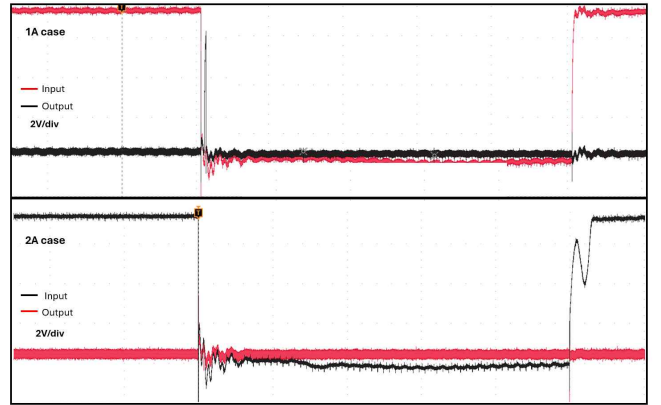
우선 실제 Buck Converter 적용에 앞서, 함수 생성기를 이용한 입력 신호를 통해 Holder and Sampler 회로의 기본 동작을 검증하였다. 그림 3은 해당 회로의 동작 특성을 나타낸다. Off 상태에서 On 상태로 전이되는 시점에서 Pulse가 생성되며, 이후 한 주기 동안 출력 전압이 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 이는 스위칭 순간의 특정 시점을 기준으로 전압을 샘플링하고 이를 유지하는 회로의 설계 의도가 정상적으로 구현되었음을 의미한다. 또한 이상적인 입력 조건에서는 입력된 On 상태 전압과 출력 전압이 거의 동일하게 나타나, 회로가 높은 정확도로 On 상태 전압을 추출할 수 있음을 확인하였다. 다만, 클램핑 회로의 특성상 다이오드의 순방향 전압(Vf)이 포함되어 측정되므로, 정확한 On 전압을 산출하기 위해서는 해당 전압을 보정하여 제거할 필요가 있다. 이러한 보정 과정은 후속 Ron 추정의 정확도를 좌우하는 중요한 요소로 작용한다.

이후 실제 Buck Converter 환경에서 동일한 측정을 수행하였다. 다양한 전류 조건에서 전압을 측정하고 이를 기반으로 Ron을 추정하였다. 그림 4는 전류 변화에 따른 전압 측정 결과를 나타낸다. 함수 생성기를 이용한 이상적인 조건과 달리, 실제 스위칭 환경에서는 입력값과 측정값 간에 유의미한 차이가 발생하였다. 예를 들어 1 A 조건에서는 측정 전압(Vm)이 1.1 V로 나타났으며, Vf=0.95 V를 제외할 경우 약 150 mV의 On 전압(Von)이 도출되었다. 2 A 조건에서도 유사한 경향이 관찰되었으며, 관련 결과는 표 1에 정리되어 있다. 전류 증가에 따라 상대적인 오차율은 감소하는 경향을 보였으나, 절대적인 전압 오차는 증가하는 특성이 나타났다. 이는 전류 증가에 따라 도통 경로 상의 저항 성분에 의한 전압 강하가 비례적으로 증가하기 때문이며, 동시에 측정 회로 내부의 기생 저항 및 배선 저항, 접촉 저항 등이 복합적으로 작용한 결과로 해석된다. 또한 고속 스위칭 과정에서 발생하는 dv/dt 및 di/dt에 의해 측정 회로에 추가적인 동적 오차가 유입될 가능성도 존재한다.

전압 및 전류 측정 결과를 기반으로 Ron을 추정한 결과, 대상 GaN MOSFET의 기준 Ron 값이 70 mΩ임에도 불구하고, 1 A 및 2 A 조건에서 추정된 값은 표 1과 같이 실제 값과 비교하여 상당한 차이를 보였다. 이는 전압 측정 과정에서 포함된 오프셋이 $Ron = Von/I$ 계산에 직접적으로 반영되면서 오차가 발생한 것으로 확인할 수 있다.



[그림 3] 함수 생성기를 통한 회로 동작 확인



[그림 4] Buck Converter MOSFET 측정 결과

[표 1] 회로 측정 결과

Current	Vm	Von(Vm-Vf)	Error(Vin-Vf)	Ron
1A	1.1V	250mV	195mV	150mΩ
2A	1.215V	365mV	255mV	132.5mΩ

제안된 측정 회로는 이상적인 입력 조건에서는 On 상태 전압을 높은 정확도로 추출할 수 있음을 확인하였다. 그러나 실제 Buck Converter와 같은 고속 스위칭 환경에서는 회로 내부 저항, 기생 성분 등의 영향까지 측정 오차가 발생함을 확인하였다. 이러한 오차는 전류 증가에 따라 절대값 기준으로 확대되며, 결과적으로 Ron 추정 정확도에 직접적인 영향을 미친다.

3. 결론

본 연구에서는 GaN MOSFET의 On-state 전압을 정밀하게 측정하고 이를 기반으로 Ron을 추정하기 위한 클램핑 기반 측정 회로와 Holder and Sampler 구조를 제안하고, Buck Converter 환경에서 그 성능을 검증하였다. 제안된 회로는 Off 상태에서의 고전압을 효과적으로 제한하면서도 On 상태의 미세 전압을 선택적으로 추출할 수 있어, 넓은 동적 범위를 가지는 스위칭 환경에서도 측정 가능성을 확보하였다.

함수 생성기를 이용한 이상적인 조건에서는 입력 전압과 측정 전압이 거의 일치하여 회로의 기본 동작 및 높은 측정 정확도를

확인하였다. 그러나 실제 Buck Converter 환경에서는 측정 회로 내부의 저항 성분, 기생 요소, 다이오드 전압 강하, 그리고 스위칭에 따른 동적 영향으로 인해 측정 오차가 발생하였다. 특히 전류 증가에 따라 상대 오차율은 감소하는 반면 절대 오차는 증가하는 특성이 나타났으며, 이러한 오차는 Ron 추정값에 직접적으로 반영되어 실제 값과의 차이를 유발하였다.

이러한 결과는 고속 스위칭 환경에서의 On-state 전압 측정이 단순한 정적 측정 문제를 넘어, 회로 구성 요소와 동적 특성을 모두 고려해야 하는 복합적인 문제임을 시사한다. 따라서 향후에는 클램핑 회로의 전압 강하에 대한 정밀 보정, 측정 경로의 저항 및 기생 성분 최소화, 등의 보상 기법이 고려되어야 할 필요가 있다. 이를 통해 보다 정확하고 신뢰성 높은 Ron 기반 상태 진단 기법으로 확장될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] Y. Dong, G. Zhang, G. He, and W. Si, "A novel control strategy for uninterruptible power supply based on backstepping and fuzzy neural network," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 5306-5313, 2023.
- [2] C.-C. Yeh and M. D. Manjrekar, "A reconfigurable uninterruptible power supply system for multiple power quality applications," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 22, no. 4, pp. 1361-1372, Jul. 2007.
- [3] A. Lahyani, P. Venet, A. Guermazi, and A. Troudi, "Battery/supercapacitors combination in uninterruptible power supply (UPS)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 4, pp. 1509-1522, Apr. 2013.
- [4] C. V. Nayar, M. Ashari, and W. W. L. Keerthipala, "A grid-interactive photovoltaic uninterruptible power supply system using battery storage and a back up diesel generator," *IEEE Trans. Energy Convers.*, vol. 15, no. 3, pp. 348-353, Sep. 2000.
- [5] M. S. Racine, J. D. Parham, and M. H. Rashid, "An overview of uninterruptible power supplies," in *Proc. 37th Annu. North Amer. Power Symp. (NAPS)*, 2005, pp. 159-164.
- [6] N. Vazquez, C. Aguilar, J. Arau, R. O. Caceres, I. Barbi, and J. A. Gallegos, "A novel uninterruptible power supply system with active power factor correction," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 17, no. 3, pp. 405-412, May 2002.
- [7] J. Liao, C. Guo, L. Zeng, W. Kang, N. Zhou, and Q. Wang, "Analysis of residual current in low-voltage bipolar DC system and improved residual current protection scheme," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 71, pp. 1-13, 2022.
- [8] X. Luo, Y. Du, X. H. Wang, and M. L. Chen, "Tripping characteristics of residual current devices under nonsinusoidal currents," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 47, no. 3, pp. 1515-1521, May-Jun. 2011.
- [9] F. Freschi, "High-frequency behavior of residual current devices," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 27, no. 3, pp. 1629-1635, Jul. 2012.