

Low Voltage DC-DC Converter (LDC)의 동기정류 스위치 소자에 대한 비교 분석

이철

인피니언 테크놀로지스 코리아

Comparative Analysis on LDC Synchronous Rectifier Power Switches

Cheol Lee

Infineon Technologies Korea

ABSTRACT

LDC는 Traction Inverter와 On-Board Charger (OBC)와 함께 친환경 자동차의 동력계통을 구성하는 중요한 전력변환장치로, 최적화되고 고효율의 LDC 설계는 차량의 에너지 소비효율과 주행거리에 직접적인 영향을 주고 있다. LDC에서 높은 효율과 양방향으로의 에너지 흐름 요구사항으로 인해 LDC의 2차측에는 동기정류 스위칭 방식이 널리 사용되고 있고, 동기정류 스위치 소자의 사양은 LDC의 설계에 있어서 topology, 마그네틱 부품, 효율 등 LDC 시스템의 전반에 직접적인 영향을 준다. 따라서, 본 논문에서는 LDC의 실사용 조건들을 리뷰하고, simulation 및 비교분석을 통해 최적의 동기정류 스위치 소자를 제안한다.

1. 서론

LDC는 친환경 자동차에서 고전압 배터리를 입력으로 하고 저전압을 출력으로 하여 차량내의 12V 배터리를 충전 할 뿐만 아니라 차량 내 오디오 시스템, 램프, 와이퍼 등 악세사리 부하들에 직접적으로 전원을 공급하기도 한다. 따라서 LDC는 자동차의 운행동안 지속적으로 동작하여야 하여 높은 효율을 만족하여야 하고, LDC의 입출력에는 배터리 외에 다양한 부하와 기타 전력변환 장치들이 연결되어 있는 관계로 넓은 입출력 전압 범위에서 동작 할수 있어야 하며, 무게를 줄여 연비효율 향상하기 위해 높은 전력밀도도 만족 하여야 한다. 따라서 최적의 LDC설계에는 최적의 topology와 스위치 소자들을 필요로 하고 있다.

LDC의 출력단은 저전압 대전류 사용조건으로 시스템의 효율을 높이기 위해 다이오드 보다는 동기정류 스위칭 방식이 많이 사용되고 있고, 동기정류 스위치 소자에서 스위칭 손실보다 도통 손실이 절대적으로 크기에 높은 효율을 맞추는데 유리한 낮은 도통 저항의 동기정류 스위치 소자들이 활발히 개발되어 왔다. 하지만 실제 차량 시스템 레벨에서 LDC의 동작 조건을 보면 LDC의 입력에 기존보다 더 높고 더 넓은 범위의 전압이 인가 되는 경우가 많아 지고 이로 인해 동기정류 스위치도 상응하게 더 높은 전압 스트레스를 받게 되는데, 현재의 동기정류 스위치 소자들은 도통 저항을 낮추는데 집중하다 보니 기존의 topology와 스위치 소자로 더 높고 더 넓은 입력전압범위를 만족할수 없게 되어 LDC의 topology 자체를 변경하는 상황이 발생하고 있다. 따라서, 본 논문에서는

차량 시스템에서 LDC의 실사용 조건에 대한 검토를 통해 LDC에 인가되는 전압들을 분석하고, simulation을 통해 이러한 입력 전압 조건을 맞출 수 있는 최적의 동기화 스위치 소자를 제안 한다.

2. LDC의 동작조건 및 동기정류 스위치 소자에 대한 비교 분석

2.1 LDC의 Topologies

LDC의 입력단은 고전압 bus에, 출력단은 저전압 bus에 연결되어 있는 관계로 LDC에서는 입출력단의 절연을 요구하고 있고, 따라서 topology도 변압기가 포함된 절연형 컨버터 topology를 필요로 하고 있다. LDC의 topology와 관련하여 다양한 연구가 진행되어 많은 논문들이 발표되었고, 대체적으로 고전압단에는 Full-Bridge, Phase-Shift Full-Bridge (PSFB), Full-Bridge LLC, Dual-Active Full-Bridge, Active-Clamp Forward/Fly-back 등 topology를 제안하고, 저전압 단에는 Full-Bridge, Center-Tap, Current-Double 등 topology를 제안하고 있다.^[1] 다만, 실제 양산 제품들에서는 LDC의 치수, 무게, 전력밀도, 효율, 재료비 등 현실적인 요구사항들을 만족하여야 하기에 LDC에 적용되는 스위칭 소자들의 내압, 부품수, 변압기 사양 등 이유로 그림1과 같이 PSFB with Center-Tap topology가 가장 많이 사용되고 있다.

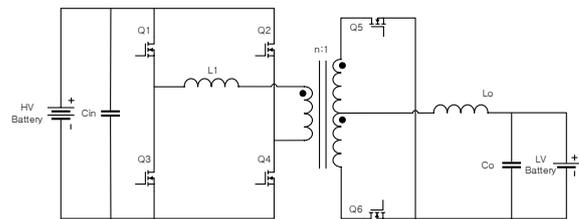


그림1 Phase-Shift Full-Bridge with Center-Tap Topology
Fig.1 Phase-Shift Full-Bridge with Center-Tap Topology

PSFB with Center-Tap topology에서 고전압단의 스위치 소자들에는 입력전압만큼 전압이 인가되나, 저전압단의 동기정류 스위치 소자들에는 수식(1)과 같이 입력 전압이 변압기의 턴비를 거쳐 출력단으로 전달된 전압의 2배가 인가되게 된다.

$$V_{ds} = \frac{V_{in}}{n} \times 2 \quad (1)$$

따라서, 동기정류 스위치 소자를 선정 시, 고효율을 맞추기 위해 낮은 도통 저항을 고려하여야 할 뿐만 아니라 적절한 내압도 함께 고려하여야 한다.

2.2 실사용 조건에서의 LDC 입력 전압

2.2.1 고전압 배터리 팩의 전압 범위

차량단에서 LDC의 입력은 고전압 배터리 팩이 되는데, 고전압 배터리 팩은 여러개의 모듈을 직렬하여 특정 전압과 에너지량을 만족하고 있고, 배터리 모듈은 또 여러개의 배터리 셀을 직렬하여 구성 된다. 따라서, 직렬연결된 배터리 셀 수와 직렬연결된 배터리 모듈 수에 따라 고전압 배터리 팩의 전압 범위가 결정 된다.

또한, 배터리 셀 종류도 크게 Nickel-Manganese-Cobalt (NMC) 과 Lithium-Iron-Phosphate (LFP) 종류로 구분 되는데, 두 종류의 배터리 셀의 사양, 특히 cutoff voltage 사양이 달라서^[2] 동일 수량의 셀과 모듈을 직렬연결하더라도 배터리 팩에서는 다른 전압범위를 갖게 되는데, 대체적으로 배터리 팩은 220V~450V의 넓은 전압 범위를 갖게 된다.^{[1][3]}

2.2.2 차량 시스템 레벨에서의 LDC 입력전압에 대한 영향

차량 레벨에서 Traction Inverter, OBC, LDC등 전력변환 장치들은 고전압 bus에 함께 연결되어 있어서 동작 중에 서로 영향을 받게 된다. 특히, 기존의 친환경 차량에서는 Traction Inverter, OBC, LDC 등 전력변환장치들은 모두 단품상태로 각각의 housing에 조립했으나 최근에는 x-in-1 컨셉으로 전력변환장치들이 하나의 housing에 통합되는 추세이고, 이로 인해 LDC의 입력에 다른 전력변환 장치들에서 발생하는 noise 전압, 예를 들면 Traction Inverter의 ripple voltage나 Back Electromotive Force (EMF) 전압이 기존 보다 더 높게 인가되어 LDC의 실제 입력 전압은 배터리 팩 전압보다 더 높아져 동기정류 스위치 소자를 선정할 때에도 더 높은 내압의 스위치 소자로 선정하여야 한다.^{[4],[5]}

추가적으로, 그림2와 같이 LV123 표준에서는 HV_2b와 같이 정상동작 범위 외에 Maximum Operating Voltage, Upper HV Circuit Limit Voltage, Overvoltage at Load Dump등 추가적인 입력전압 조건들도 제시하고 있어서 LDC의 실제 동작 전압은 고전압 배터리 팩의 전압보다 더 넓은 범위와 더 높은 최대값을 갖게 된다.

HV voltage ranges	HV operating status	Unit	HV_1	HV_2a	HV_2b	HV_3
Overvoltage at load dump ^a	B3/B4	V pk	220	410	500	800
Upper HV circuit limit voltage ^a	B3/B4	V pk	220	410	500	800
Maximum operating voltage ^c	B2	V d.c.	200	360	470	770
Upper limited operating capability ^b	B2	V d.c.	>190 - 200	> 340-360	>450 - 470	>750 - 770
Unlimited operating capability ^a	B1	V d.c.	90 - 190	170 - 340	250 - 450	520-750
Lower limited operating capability ^a	B2	V d.c.	80 - < 90	160 - < 170	200 - < 250	450 - < 520
Highly limited operating capability ^a	B2 ^a B3 ^b	V d.c.	60 - < 80	120 - < 160	150 - < 200	-

그림2 LV123 표준에서 규정하는 고전압 동작전압표
Fig.2 HV operating voltage ranges from LV123 standard

2.3 Simulation을 통한 동기정류 스위치 소자들에 대한 비교 분석

본 논문에서는 LDC의 최적의 동기정류 스위치 소자를 찾기 위해 실사용에서 가장 많이 사용되는 PSFB with Center-Tap

topology와 12:1의 변압기 턴비를 적용하였고, 입력전압은 1) LV123 HV_2b에서 명시한 unlimited operating range인 250V~450V, 2) LV123 HV-2b에서 명시한 Overvoltage at Load Dump 조건인 500V, 및 3) 차량단에서의 noise 전압이 유입되는 조건을 감안한 550V 입력전압 조건으로 비교 검토 하였다.(550V는 예시이고, 실제 noise 전압은 자동차 제조사에 따라 달라질수 있다.)

본 논문에서는 실제 실험이 아닌 simulation으로 비교분석하는 관계로 동기정류 스위치 소자들의 실제 동작특성을 반영할수 있는 SPICE 모델을 사용하여 SIMetrix로 simulation 하였고, 그림3과 같이 Double Pulse Test 회로에서 동기정류 스위치 소자의 실제 동작조건으로 맞추어 소자 양단에 인가되는 전압을 비교하였다.

그림3에서 V3은 LDC에서 입력전압이 변압기의 턴비로 2차측으로 전달된 전압을 나타내고, 검증하려는 동기정류 스위치 소자는 U9가 되겠다. 비교검증에서 동기정류 스위치 소자로 Infineon Technologies의 100V/1.9mR (IAUT260N10S5N019) MOSFET과 120V/1.8mR (IAUTN12S5N018T) MOSFET을 사용 하였다.

그림4는 100V/1.9mR MOSFET 적용 시 위에 언급한 세가지 입력전압 조건에서 동기정류 스위치 소자의 양단에 인가되는 전압 V_{DS} 와 바디 다이오드를 통해 흐르는 전류 I_{SD} 의 simulation 파형을 보여주고 있고, 그림5는 120V/1.8mR MOSFET을 적용시 동기정류 스위치 소자의 양단에 인가되는 전압 V_{DS} 와 바디 다이오드를 통해 흐르는 전류 I_{SD} 의 simulation 파형을 보여주고 있으며, simulation 결과값은 표1에 정리하였다. 그림4 와 그림5 에서 윗쪽 파형은 동기정류 스위치 소자의 바디 다이오드에 흐르는 전류 I_{SD} 의 파형이고, 아래쪽 그래프는 동기정류 스위치 소자의 Drain-Source 양단에 인가되는 전압 V_{DS} 의 파형이며, 전압 파형에서 아래에서 위로 순차적으로 입력전압이 각각 450V, 500V, 및 550V로 인가 될 때의 전압 파형을 보여주고 있다.

Simulation 결과로부터 100V MOSFET은 추가적인 스너버 회로를 적용하면 많은 논문과 LV123 HV_2b에서 명시한 unlimited operating range인 ~450V 까지에서는 사용 가능하나 load dump나 Traction Inverter의 noise가 유입되는 상황에서는 내압 마진이 부족함을 알수 있다. 120V MOSFET은 세가지 입력전압 조건에서 모두 적용 가능하여 차량 시스템 레벨에서의 실사용 조건을 감안하면 LDC의 최적의 동기정류 스위치 소자는 120V MOSFET 이 되겠다.

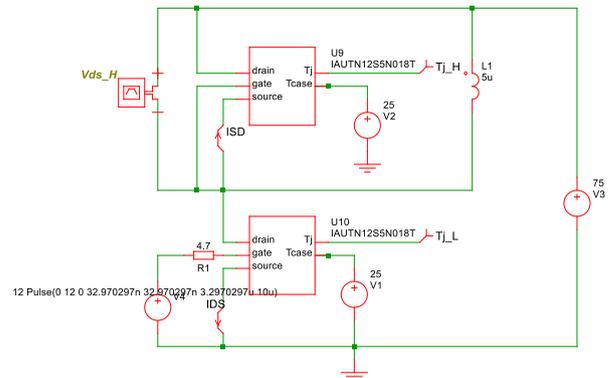


그림3 Simulation에 사용된 Double Pulse Test 회로
Fig.3 Double Pulse Test Schematic used for simulation

참고 문헌

- [1] C. Wang, P. Zheng and J. Bauman, "A Review of Electric Vehicle Auxiliary Power Modules: Challenges, Topologies, and Future Trends," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 38, no. 9, pp. 11233-11244, Sept. 2023.
- [2] Yu, Quan-Qing, et al. "A comparative study on open circuit voltage models for lithium-ion batteries." Chinese Journal of Mechanical Engineering 31.1 (2018): 1-8.
- [3] L. Zhu, H. Bai, A. Brown and M. McAmmond, "Design a 400 V-12 V 6 kW Bidirectional Auxiliary Power Module for Electric or Autonomous Vehicles With Fast Precharge Dynamics and Zero DC-Bias Current," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 36, no. 5, pp. 5323-5335, May 2021.
- [4] S. M. N. Hasan, M. N. Anwar, M. Teimorzadeh and D. P. Tasky, "Features and challenges for Auxiliary Power Module (APM) design for hybrid/electric vehicle applications," 2011 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, Chicago, IL, USA, 2011, pp. 1-6.
- [5] R. Badawi, S. Wybo, M. Teimorzadeh and M. Anwar, "Impact of Vehicle Requirements on Accessory Power Module Design for Ultium Electric Vehicle Platforms," 2022 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), Detroit, MI, USA, 2022, pp. 1-8.

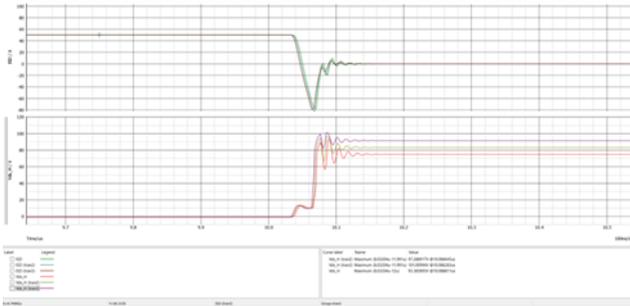


그림4 3종 입력전압 조건에서 IAUTN260N10S5N019의 V_{DS} 와 I_{DS} 의 simulation 파형
Fig.4 IAUTN260N10S5N019 V_{DS} and I_{DS} simulation waveforms at three different input voltages

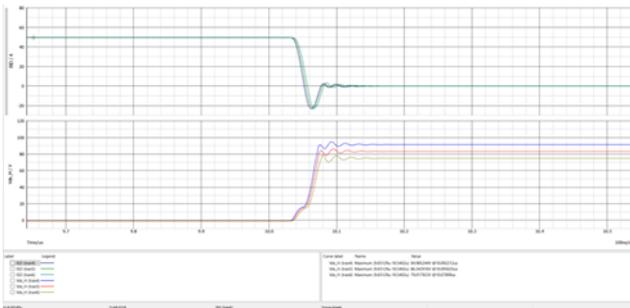


그림5 3종 입력전압 조건에서 IAUTN12S5N018T의 V_{DS} 와 I_{DS} 의 simulation 파형
Fig.5 IAUTN12S5N018T V_{DS} and I_{DS} simulation waveforms at three different input voltages

표 1 동기정류 스위치 소자 양단 정전압 및 spike 전압

Table 1 Static and Spice voltages on SR MOSFET

Vin [V]	Vds_static [V]	Vds_spike [V] (simulation)	
		IAUT260N10S5N019	IAUTN12S5N018T
450 ¹⁾	75.0	93.4	79.0
500 ²⁾	83.3	97.3	86.3
550 ³⁾	91.7	101.0	95.0

- 1) 논문 및 LV123에서 명시한 최대 입력 전압
- 2) LV123에서 명시한 load dump조건에서의 입력 전압
- 3) Inverter noise가 유입되는 경우의 입력 전압 (550V는 예시 값)

3. 결론

본 논문에서는 LDC의 topology와 입력단에 인가되는 전압들에 대해 분석하고, 이러한 요소들이 LDC의 동기정류 스위치 소자에 미치는 영향에 대해 SIMetrix에서 동기정류 스위치 소자들의 실제 동작 조건으로 스위치 소자들의 SPICE 모델을 적용하여 simulation으로 비교 분석하였다. 120V급 MOSFET의 경우 현재 가장 보편적으로 사용되는 topology와 변압기의 턴비 변경이 없이도 모든 입력전압 조건을 만족할수 있어서 LDC의 동기정류 스위치 소자로는 최적의 솔루션이 되겠다.