

PTWS를 적용한 웨어러블 AMOLED용 고집적화 3-채널 DC-DC 변환기 설계

Design of Highly Integrated 3-Channel DC-DC Converter Using PTWS for Wearable AMOLED

전 승 기*, 이 희 진*, 최 호 용*

Seung-Ki Jeon*, Hui-Jin Lee*, Ho-Yong Choi*

Abstract

In this paper, a highly integrated 3-channel DC-DC converter is designed using power transistor width scaling (PTWS). For positive voltage, V_{POS} , a boost converter is designed using the set-time variable pulse width modulation (SPWM) dual-mode and PTWS to improve efficiency at light load. For negative voltage, V_{NEG} , a 0.5 x regulated inverting charge pump is designed with pulse skipping modulation (PSM) controller to reduce power consumption, and for an additional positive voltage, V_{AVDD} , a LDO circuit is designed. The proposed DC-DC converter has been designed using a 0.18 μ m BCDMOS process. Simulation results show that the proposed converter has power efficiency of 56%~90% for load current range of 1 mA~70 mA and output ripple voltage less than 5 mV at positive voltage.

요 약

본 논문에서는 PTWS 방식을 이용한 고집적화된 AMOLED용 3-채널 DC-DC 변환기의 설계를 다룬다. 양의 전압 V_{POS} 는 경부하에서 효율을 제고하기 위해 SPWM 듀얼모드와 PTWS 방식을 적용한 부스트 변환기로 설계한다. 음의 전압 V_{NEG} 는 전력 손실을 줄이기 위해 PSM 방식을 적용한 0.5x 인버팅 차지펌프를 이용해 설계하고, 추가적인 전압 V_{AVDD} 는 LDO를 이용하여 설계한다. 제안된 DC-DC 변환기는 0.18 μ m BCDMOS 공정을 사용하여 시뮬레이션을 한 결과 부하전류 1mA~70mA에서 전력효율 56.9%~90.2%를 가지고, 양의 전압 V_{POS} 에서 최대 5mV의 출력 리플을 가졌다.

Key words : PTWS, SPWM, DC-DC converter, AMOLED display, charge pump, boost, LDO

* School of Electrical and Computer Engineering,
Chungbuk National University

★ Corresponding author

E-Mail : hychoi@cbnu.ac.kr, Tel : +82-43-261-3231

※ Acknowledgment

This research was supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2018R1D1A1B07046871) and the KIAT grant funded by the Korea government MOTIE (No. 0001883).

Manuscript received Sep. 5, 2019; revised Sep. 25, 2019; accepted Sep. 27, 2019.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서론

AMOLED는 얇은 구조, 빠른 응답속도, 고휘도 비저전력 소모 등의 뛰어난 특성을 가지고 있다[1, 2]. 최근 이러한 특성으로 인해 스마트폰, 웨어러블 디바이스 등 휴대용 기기의 AMOLED 디스플레이 사용이 점점 증가되고 있다. 그리고 이러한 AMOLED 디스플레이에 사용하기 위한 전력 반도체의 연구가 활발히 이루어지고 있다[3-7].

웨어러블 AMOLED 디스플레이는 낮은 출력리플과 고효율을 가지는 양의 전압과 음의 전압을 필요로 한다. 그리고 휴대용 기기에 적용하기 위해 인덕터 등 소자의 사용을 최소화 하여 저면적으로

설계되는 것이 요구되고 있다[8-10]. 특히 웨어러블 AMOLED 디스플레이 경우 경부하에서 동작하는 비중이 크기 때문에 경부하에서의 효율을 제고하는 것이 중요하다. 추가적으로 양의 전압의 경우 낮은 출력 리플과 MDDI(mobile display driver IC), 터치 IC 드라이버 등을 동작시키기 위해 다양한 전압 레벨이 요구된다.

본 논문에서는 고집적화된 웨어러블 AMOLED용 3-출력 DC-DC 변환기를 설계한다. 양의 전압은 낮은 출력 리플과 경부하에서의 효율 제고를 위해 PTWS(power transistor width scaling) 방식을 적용한 SPWM(set-time variable pulse width modulation) 듀얼모드 부스트(boost)변환기로 설계한다. 음의 전압은 면적 대비 효율을 높이기 위해 0.5 x 인버팅 차지펌프(inverting charge pump)로 설계한다. 부가해서 터치 IC 구동을 위한 양의 전압을 생성하기 위해 LDO (low dropout)를 설계한다.

II. AMOLED 용 고집적화 3-채널 DC-DC 변환기 설계

본 논문에서는 AMOLED 디스플레이용 고집적화 3-채널 DC-DC 변환기를 설계한다.

표 1은 제안하는 DC-DC 변환기의 주요 특성을 보여준다. DC-DC변환기의 입력 전압은 2.9 V~4.6 V이며 양의 전압 V_{POS} 는 부스트 변환기를 이용하여 고정된 전압 4.6 V를 가진다.

Table 1. Main characteristics of 3-channel DC-DC converter.
표 1. 3-채널 DC-DC 변환기의 주요 특성

Item	V_{POS}	V_{NEG}	V_{AVDD}
Vin	2.9 V~4.6 V		
Vout	4.6 V	-0.6 V~-2.3 V	2.8 V
Load current	1 mA~70 mA		1 mA~30 mA
Output voltage ripple	<5 mV	<20 mV	<5 mV
Frequency	0.6MHz~1.27MHz	1MHz	-
Efficiency	>80%	>60%	>80%

음의 전압 V_{NEG} 는 0.5 x 인버팅 차지펌프를 사용하여 -0.6 V~-2.3 V의 전압을 가진다. 또한 양의 전압 V_{AVDD} 는 LDO를 사용하여 고정된 출력전압 2.8 V를 가진다.

그림 1은 3채널 DC-DC 변환기의 블록도를 보여준다. V_{POS} 는 부스트 변환기로, V_{AVDD} 는 LDO로, V_{NEG} 는 0.5x 인버팅 차지펌프로 구성된다. 다음은 V_{NEG} , V_{POS} , V_{NEG} 각 채널 설계에 대해 기술한다.

1. V_{POS} 생성을 위한 부스트 변환기

그림 1의 왼쪽 블록은 양의 전압 V_{POS} 생성회로로 부스트 변환기를 가진다. 변환기는 CMC(current mode control) 모드로, 출력전압과 인덕터 전류를 피드백 받아 고정된 출력전압을 생성한다. 변환기는 오차 증폭기와 인덕터 전류를 센싱하는 전류 센서, 인덕터의 역전류를 감지하는 제로 전류 감지기, 부하에

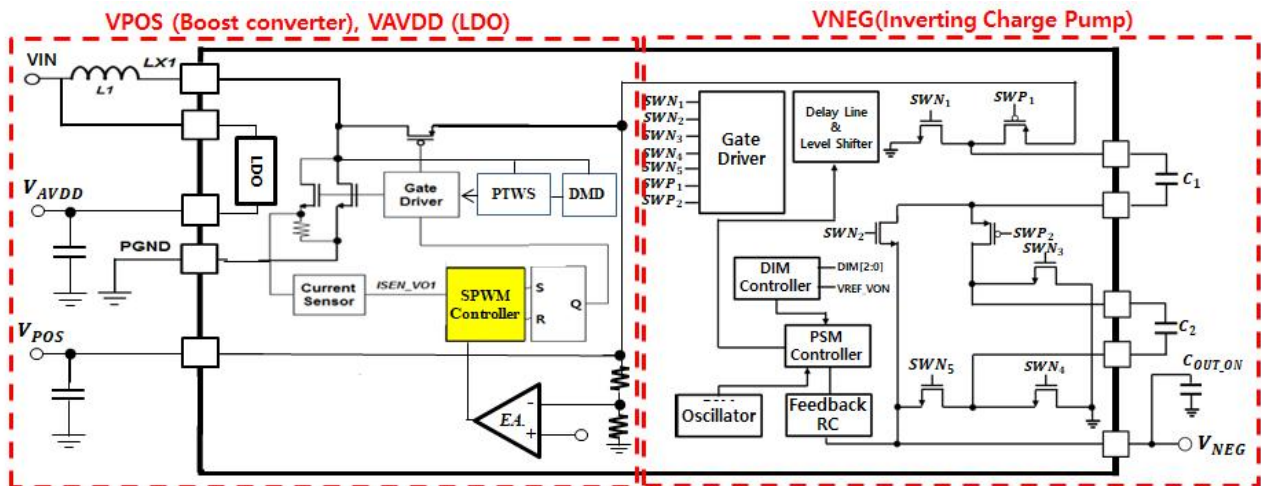


Fig. 1. Block diagram of 3-ch DC-DC converter.

그림 1. 3-채널 DC-DC 변환기 블록도

따라 스위칭 주파수를 제어하는 SPWM 제어기, 부하에 따라 스위칭 트랜지스터의 크기를 제어하는 PTWS 제어기 등으로 구성된다.

가. SPWM을 이용한 Dual mode

SPWM 방식은 기본적인 PWM 방식에 VCO를 이용하여 경부하에서 부하전류에 따라 스위칭 트랜지스터 구동을 위한 set signal의 set time을 가변함으로써 스위칭 주파수를 가변하는 방식이다[11].

그림 2는 제안된 SPWM 제어기를 보여준다. VCO를 통해 부하 전류에 따라 변화하는 EA (error amplifier) 출력 V_{ERR} 를 이용하여 주파수가 변화되는 set signal $V_{VCO-set}$ 을 생성한다. 그리고 두 개의 비교기를 통해 고정된 스위칭 주파수를 가진 set signal $V_{PWM-set}$ 을 생성한다. 그리고 모드 셀렉터 (mode selector)는 생성된 2개의 전압 $V_{VCO-set}$ 과 $V_{PWM-set}$ 중 작은 주파수를 가진 신호를 선택하여 set signal V_{setclk} 을 생성한다. 따라서 set signal V_{setclk} 은 경부하에서는 부하 전류에 비례하는 스위칭 주파수를 가지고, 중부하에서는 부하 전류에 상관없이 일정한 스위칭 주파수를 가진다.

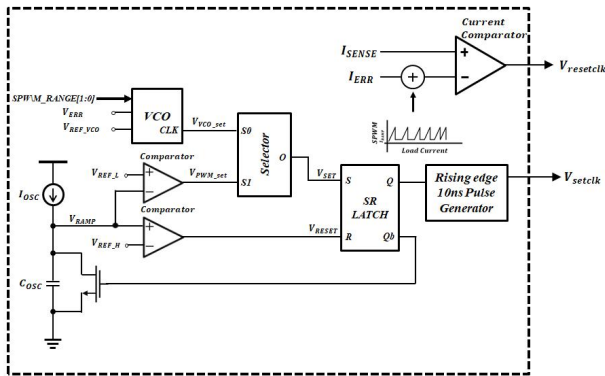


Fig. 2. SPWM controller.
그림 2. SPWM 제어기

reset signal $V_{resetclk}$ 은 램프 파형 I_{RAMP} 와 에러 전류 I_{ERR} 를 합한 값과 인덕터 전류 I_{SENSE} 를 전류 비교기를 이용하여 비교하여 생성된다. V_{setclk} 과 $V_{resetclk}$ 은 SR 래치에 인가되어 전력 스위칭 트랜지스터의 제어 신호를 생성한다.

SPWM 방식은 듀얼모드를 동작시키기 위해 VCO와 모드 셀렉터만을 필요로 하기 때문에 저면적으로 구현 가능하고, set signal을 주기적으로 가

지고 있어 PSM 방식에 비해 출력 전압의 리플이 작다.

나. PTWS 제어기

PTWS 제어기는 전력 스위칭 트랜지스터의 분할을 통해 전력 스위칭 트랜지스터의 게이트 캐패시턴스 값을 줄여 경부하에서의 스위칭 트랜지스터의 스위칭 손실을 줄임으로써 변환기의 전력 효율을 제고한다.

그림 3은 PTWS 제어기를 보여준다. PTWS 제어기는 DMD(discontinuous mode detector)와 카운터, 주파수 분주기, 레지스터, 게이트 드라이버, 그리고 2개로 나누어진 전력 스위칭 트랜지스터로 구성된다.

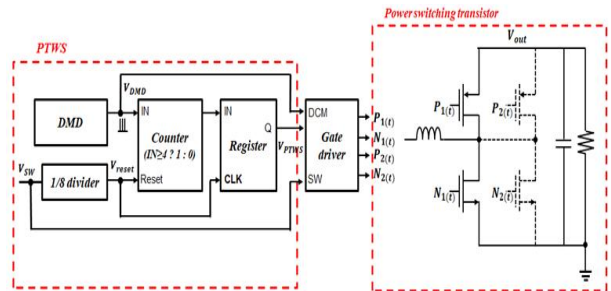


Fig. 3. PTWS controller.
그림 3. PTWS 제어기

PTWS 제어기는 주파수 분주기를 통해 판단 구간을 설정하여 DCM(discontinuous current mode) 동작을 위한 DMD의 출력의 개수를 카운터하여, 부하의 상태를 판단 하는 회로이다. PTWS 제어기는 DMD의 출력 개수로 부하를 판단한 후, 경부하에서는 Low, 중부하에서는 High 신호를 출력한다.

PTWS 제어기의 출력이 Low일 경우, 전력 스위칭 트랜지스터 SW_{N1} , SW_{P1} 만 on이 되어 전력 스위칭 트랜지스터의 크기가 감소하고 작은 게이트 캐패시턴스 값을 가지게 된다. PTWS 제어기의 출력이 High일 경우, 모든 전력 스위칭 트랜지스터가 on이 되어 전력 스위칭 트랜지스터는 본래의 크기를 갖고 큰 게이트 캐패시턴스 값을 가지게 된다.

경부하에서는 작은 게이트 캐패시턴스로 동작하여 스위칭 손실을 줄일 수 있고 중부하에서는 큰 게이트 캐패시턴스로 동작하여 전도 손실을 줄일 수 있다. 그리고 기존 내부 회로인 DMD와 간단한 디지털 블록을 사용하여 회로 구성이 간단하고 제어가 용이하다.

2. V_{NEG} 생성을 위한 인버팅 차지펌프

그림 1의 오른쪽 부분은 음의 전압 V_{NEG} 생성을 위한 0.5 x 인버팅 차지펌프의 블록도이다. 인버팅 차지펌프는 전력 공급을 위한 스위칭 트랜지스터와 PSM 컨트롤러, 오실레이터, 스위칭 트랜지스터를 제어해주는 게이트 드라이버, 컨트롤 블록으로 구성된다. 차지펌프는 출력전압과 기준 전압을 비교하여 스위칭 신호를 스킵하는 PSM 모드로 동작하여 출력전압을 제어한다.

그림 4는 0.5x 차지펌프의 스위칭 트랜지스터 동작을 보여준다. 단계1에서 캐패시터 C_1 은 다른 캐패시터 C_2 와 직렬로 연결된다. 입력 전류는 두 캐패시터 C_1, C_2 를 충전시키게 된다. 단계2에서는 캐패시터 C_1, C_2 가 병렬로 연결되고 방전된다. 충전시 캐패시터가 직렬로 연결되고 방전시 병렬로 연결되어 평균 입력 전류는 부하 전류의 50%가 된다. 그러므로 일반 변환기와 같은 효율을 유지하면서 인덕터 소자를 사용하지 않아 면적을 줄일 수 있다.

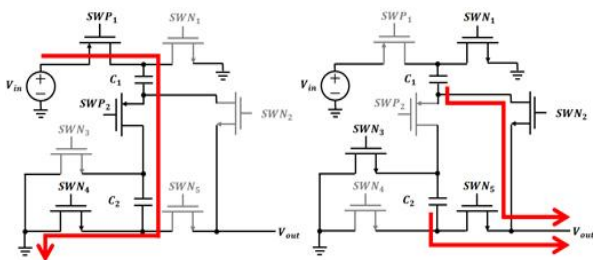


Fig. 4. Operations of 0.5 x inverting charge pump (a) phase 1 (b) phase 2.

그림 4. 0.5 x 인버팅 차지펌프 동작 (a) 단계 1 (b) 단계 2

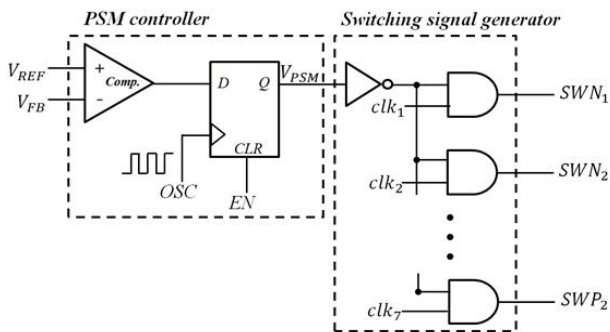


Fig. 5. PSM controller and switching signal generator.

그림 5. PSM 제어기와 스위칭 신호 생성기

그림 5는 PSM 제어기와 스위칭 신호 생성기를 보여준다. PSM 제어기에서 출력전압으로부터 피

드백된 신호와 기준전압을 비교하여 V_{PSM} 신호를 생성한다. V_{PSM} 신호는 전체 스위칭 신호의 on/off를 제어한다. PSM 제어기는 불필요한 스위칭을 줄여주어 전력 손실을 줄인다.

3. V_{AVDD} 생성을 위한 LDO

양의 전압 V_{AVDD} 는 그림 6과 같은 회로로 설계한다. 기준전압과 피드백된 출력전압을 오차 증폭기를 이용하여 오차를 증폭한 후, 패스 트랜지스터의 게이트 소스 전압 V_{GS} 를 조절하여 일정한 출력 전압이 유지되도록 제어한다. LDO를 이용하여 출력 전압의 리플을 최소화 한다.

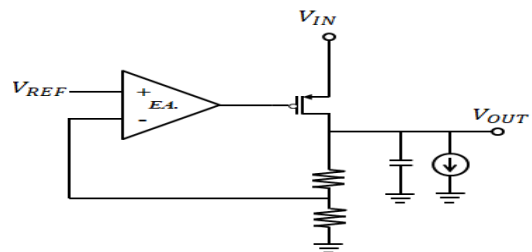


Fig. 6. LDO circuit.

그림 6. LDO 회로

III. 시뮬레이션 결과

II장에서 제안한 3-채널 DC-DC 변환기를 0.18 μm BCDMOS 공정을 이용하여 시뮬레이션을 하였다. 그림 6은 입력전압 3.3V, 부하전류 20 mA에서의 각 변환기 채널의 출력과 리플을 보여준다. V_{POS} 4.6 V와 V_{AVDD} 2.8 V의 고정된 양의 출력전압과 V_{NEG} -2.3 V의 음의 출력전압을 보여주고, 출력 리플은 V_{POS}, V_{NEG} 에서 각각 2.23 mV, 18.3

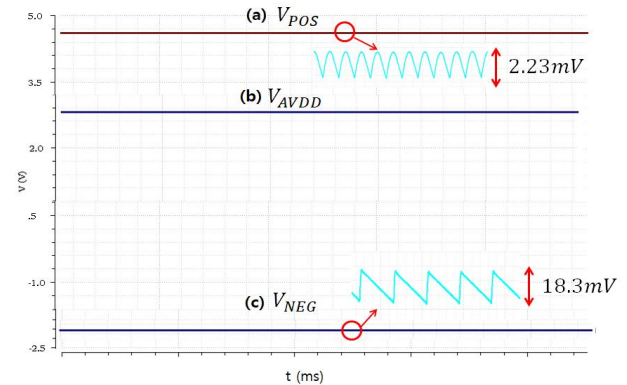


Fig. 7. Characteristics of output voltages and ripples.

그림 7. 출력 전압 및 리플 특성

mV를 가진다.

그림 8은 입력전압 3.3V에서 부하 50mA, 10mA 일 때, 부스트 변환기의 스위칭 신호 변화를 보여 준다. 중부하의 경우 PWM 동작하여 고정된 주파수 1.27MHz로 동작하게 되며 경부하의 경우 SPWM 으로 동작하여 부하전류에 따라 스위칭 주파수가 0.6MHz~1.27MHz로 가변한다. 또한 중부하의 경우 인덕터에 역전류가 흐르지 않아 CCM모드로 동작하게 되어 PTWS 신호가 High가 되고 스위치 SW_{P1} , SW_{P2} 모두 동작한다. 경부하의 경우 인덕터에 역전류가 흘러 DCM 모드로 동작하게 되어 PTWS 신호가 LOW가 되고 스위치 SW_{P1} 만 동작하게 된다.

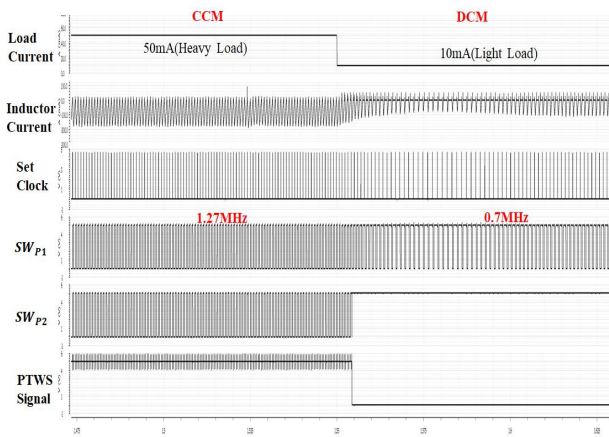


Fig. 8. Waveforms of DC-DC boost converter.
그림 8. DC-DC 부스트컨버터의 파형

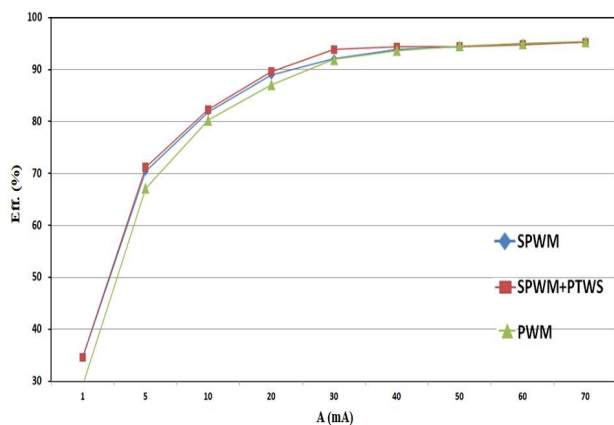


Fig. 9. Power efficiency of DC-DC boost converter.
그림 9. DC-DC 부스트 컨버터의 전력 효율

그림 9는 입력 전압 3.3V, 출력 전압 4.6V에서의 부하 전류 1mA~70mA에 대한 효율을 나타낸다.

듀얼모드 전환 부하 전류는 40mA이며, PTWS 전환 부하 전류는 50mA이다. 제안한 PTWS와 듀얼모드 방식을 사용한 부스트 변환기는 34.5%~95.2%의 전력 효율을 가졌다. 제안한 방식은 부하전류 30 mA에서 듀얼모드만을 사용한 방식에 비해 최대 1.7%의 효율 상승을 가지며 단일 PWM 방식에 비해 최대 5.4%의 효율 상승을 가졌다.

그림 10은 논문에서 제안된 PTWS를 적용한 3-채널 DC-DC 변환기의 전력효율을 나타낸다. 입력 전압 3.3V, V_{POS} 4.6V와 V_{NEG} -2.3V, V_{AVDD} 2.8V에서의 부하 전류 1 mA~70 mA에 대한 결과이다. 전체 전력 효율은 부하 전류 1 mA~70 mA에서 57%~90%로 높은 전력효율을 가진다.

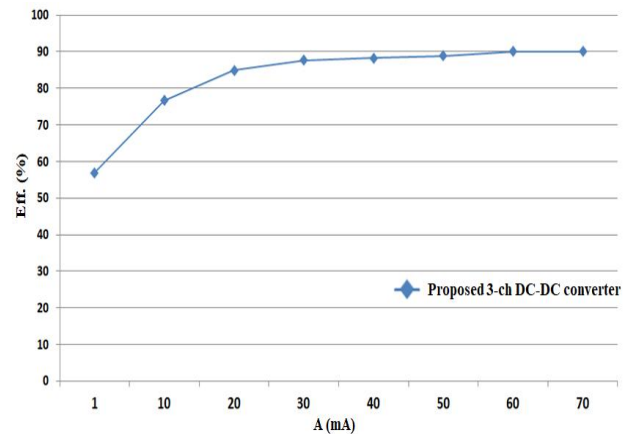


Fig. 10. Power efficiency of 3-ch DC-DC converter.
그림 10. 3채널 DC-DC 컨버터의 전력 효율

III. 결론

본 논문에서는 AMOLED 디스플레이 전용 3채널 DC-DC 변환기를 제안하였다. V_{POS} 는 PTWS제어기를 적용한 듀얼모드 부스트 변환기를 이용하여 고효율과 낮은 리플을 가지는 4.6 V 양의 전압을 생성하고 V_{NEG} 는 0.5 x 인버팅 차지펌프를 이용하여 저면적, 고효율로 -0.6 V~-2.3 V 음의 전압을 생성하고 LDO를 이용하여 낮은 리플을 가지는 2.8 V 양의 전압 V_{AVDD} 을 생성했다. 출력전압 리플은 양의 전압의 경우 최대 3 mV, 음의 전압의 경우 최대 20 mV를 가지고 부스트 변환기는 39%~95%로 기존 단일모드 동작에 비해 최대 5.4%의 효율 상승을 가졌다. 전체 DC-DC 변환기는 56.9%~90.2%의 비교적 높은 효율을 가진다.

References

- [1] S. Forrest, P. Burrows, and M. Thompson, "The Dawn of Organic Electronics," *IEEE Spectrum*, vol.37, no.8, pp.29-34, 2000. DOI: 10.1109/6.861775
- [2] Ying Wang, "Design for OLED microdisplay," *Proc. of 2010 Asia Pacific Conf. in Microelectronics and Electronics*, pp.206-209, 2010. DOI: 10.1109/PRIMEASIA.2010.5604924
- [3] Vaibhav Vaidya, Susan Soggs, Jungbae Kim, Andreas Haldi, Joshua N. Haddock, Bernard Kippelen and Denise M. Wilson, "Comparison of Pentacene and Amorphous Silicon AMOLED Display Driver Circuits," *IEEE Transaction on Circuits and Systems -I*, vol.55, no.5, pp.1177-1184, 2008. DOI: 10.1109/TCSI.2008.916548
- [4] Seok Lee, Jayang Yoon, Jaehoon Kim, Changsuk Lee, Hawoong Jung, Jaeshin Lee, and Joongho Choi, "High-capacity DC-DC converters for active matrix OLED display," *Proc. 2010 IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems*. pp. 480-483, 2010. DOI: 10.1109/APCCAS.2010.5775053
- [5] Sung-Wan Hong, Sang-Hui Park, Tae-Hwang Kong, and Gyu-Hyeong Cho, "Inverting Buck-Boost DC-DC Converter for Mobile AMOLED Display Using Real-Time Self-Tuned Minimum Power-Loss Tracking (MPLT) Scheme with Lossless Soft-Switching for Discontinuous Conduction Mode," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, Vol.50, no.10, pp.2380-2393, 2015. DOI: 10.1109/JSSC.2015.2450713
- [6] Filippo Boera, Arunkumar Salimath, Edoardo Bonizzoni, and Franco Maloberti, "Design of a SIBO DC-DC Converter for AMOLED Display Driving," *Proc. of 2018 Conf. in Microelectronics and Electronics*, pp.109-112, 2018. DOI: 10.1109/PRIME.2018.8430357
- [7] Bong-Choon Kwak, Seong-Kwan Hong, and Oh-Kyong Kwon, "A Highly Power-Efficient Single-Inductor Bipolar-Output DC - DC Converter Using Hysteretic Skipping Control for OLED-on-Silicon Microdisplays," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol.65, no.12, pp.2017-2021, 2018. DOI: 10.1109/TCSII.2018.2815994
- [8] C. S. Chae, H. P. Le, K. C. Lee, G. H. Cho, and G. H. Cho, "A Single Inductor Step-Up DC-DC Switching Converter With Bipolar Outputs for Active Matrix OLED Mobile Display Panels," *IEEE Journal of Solid-State Circuits*, vol.44, no.2, pp.509-524, 2009. DOI: 10.1109/ISSCC.2007.373625
- [9] D. Ma, W.-H. Ki, C. Y. Tsui, P. K and T. Mok, "Single-inductor multiple-output switching converters with time-multiplexing control in discontinuous conduction mode," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol.38, no.1, pp.89-100, 2003. DOI: 10.1109/JSSC.2002.806279
- [10] D. Kwon, G and A. Rincon-Mora, "Single-Inductor Multiple-Output Switching DC-DC Converters," *IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs*, vol.56, no.8, pp.614-618, 2009. DOI: 10.1109/TCSII.2009.2025629
- [11] Hak-Yun Kim, Myeong-Hak Lee, Young-Ho Shin, Jin-Won Kim, Nam-Soo Kim, and Ho-Yong Choi, "Dual-mode Inverting Buck-boost Converter using Set-time Variable PWM Method," *Journal of Semiconductor Technology and Science*, vol.18, no.4, 2018. DOI: 10.5573/JSTS.2018.18.4.423

BIOGRAPHY

Seung-Ki Jeon (Member)



2018 : BS degree in Electronics Engineering, Chungbuk National University.

2018~present : MS student in Semiconductor Engineering, Chungbuk National University.

Hui-Jin Lee (Member)

2019 : BS degree in Electronics Engineering, Chungbuk National University.

2019~present : MS student in Semiconductor Engineering, Chungbuk National University.

Ho-Yong Choi (Member)

1980 : BS degree in Electronics Engineering, Seoul National University.

1982 : MS degree in Electronics Engineering, KAIST

1994 : Ph.D. degree in Electronics Engineering, Osaka University.

1985~1996 : Associate Professor, Pukyung National University.

1996~present : Professor, Chungbuk National University