

Z-소스 인버터의 병렬운전 특성 개선

(A Characteristic Improvement for the Parallel Operation of Z-source Inverters)

김윤호* · 이옥영 · 서강문

(Yoon-Ho Kim · Woog-Young Lee · Kang-Moon Seo)

요 약

본 논문에서는 연료전지 시스템을 위한 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 연료전지 시스템의 순환전류 감쇄 방안을 검토하였다. PWM 방식으로는 Carrier phase shifted SPWM을 적용하였으며, 이 방식은 출력 전류의 고조파 성분을 줄일 수 있는 장점을 갖는다. 그러나 이 기법을 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템에 적용하는 경우 추가적으로 순환전류가 발생한다. Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템이 동작 시 발생하는 순환전류를 감소시키며, 부하전류에 낮은 고조파 성분을 가질 수 있도록 커플링된 순환전류 리액터를 사용하였다. 순환전류 리액터를 상호 커플링시킴으로써 순환전류를 추가적으로 감소시킬 수 있다. 이에 대한 적합성을 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다.

Abstract

In this paper, a circulating current reduction approach for the parallel operation of fuelcell systems with Z-source inverters is investigated. The carrier phase shifted SPWM(Sinusoidal Pulse Width Modulation) is used as a modulation method since it has an advantage in reducing output current harmonics. However, when this technique is applied to the parallel operation of Z-source inverters, it additionally produces circulating currents. A coupled circulating current reactor is used to reduce circulating current generated by the parallel operation of Z-source inverters and to reduce output current harmonics. The proposed circulating current reduction approach using coupled circulating current reactors is verified through simulation and experiment.

Key Words : Z-source inverter, Circulating current

1. 서 론

연료전지 및 태양광 시스템은 매우 유용한 대체

에너지원 중 하나이다. 이러한 대체에너지 시스템은 재 사용성, 환경 친화성과 같은 장점들을 가지고 있어서 다양한 분야에서 새로운 전력원으로 이용이 기대 되고 있다. 연료전지 및 태양광 시스템에서는 승압 컨버터를 사용하여 출력 전압을 승압시킨 후 인버터를 전원 시스템과 연계시키는 것이 일반적이다. 본 논문에서는 승압이 가능한 Z-소스 인버터를 이용한 시스템을 구성하였다. 특히 상대적으로 전력이

* 주저자 : 중앙대학교 전자전기공학부 정교수
Tel : 02-820-5290, Fax : 02-812-1407

E-mail : yhkim@cau.ac.kr
접수일자 : 2006년 11월 17일
1차심사 : 2006년 11월 28일
심사완료 : 2007년 2월 7일

높은 시스템에 사용되는 경우 병렬운전을 필요로 한다[1].

Z-소스 인버터의 병렬운전은 파라미터 불일치 시에 전류의 불균형, 순환전류 발생, 전력 불평형과 같은 문제를 야기시킬 수 있다. 본 논문에서는 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템에서 발생하는 순환전류 문제를 해결하기 위해 커플링된 순환전류 리액터를 사용한 보상기법을 제안하고 이를 시뮬레이션과 실험을 통해 입증하였다.

2. 연료전지 시스템을 위한 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템

Z-소스 인버터는 구조적으로 일반적인 인버터의 단점들을 보완하도록 개선된 토폴로지이다[1]. Z-소스 인버터의 독특한 특징 중의 하나는 단순히 인버터의 스위칭 패턴을 제어하므로 출력 전압을 승압, 감압할 수 있다는 것이다. 결과적으로 이는 Z-소스 인버터가 전압 승압을 위해 추가적인 DC/DC 부스트 컨버터가 필요하지 않다는 것이다. 다시 말해 Z-소스 인버터에서 출력 전압의 크기는 스위칭 패턴에 의해 다양하게 가변 가능하다.

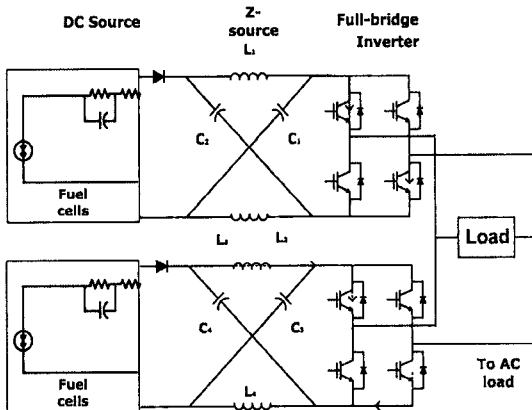


그림 1. 연료전지 시스템을 포함한 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 토폴로지
Fig. 1. Fuel cell system with parallel operation of Z source inverters

그림 1은 연료전지 시스템을 포함한 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 토폴로지를 나타낸다. 병렬운

전은 두 개의 다른 시스템이 하나의 부하에 병렬로 연결된 것을 의미한다. 만약 Z-소스 네트워크 L, C의 파라미터와 각 시스템의 스위칭 시간이 완전히 일치하지 않는다면 병렬운전은 파라미터와 스위칭 시퀀스의 불일치 시에 전류의 불평형, 순환전류, 전력 불평형과 같은 문제를 갖게 된다. 본 논문에서는 병렬운전 시 발생하는 문제점 중 순환전류를 분석하고 이를 보상하는 방법을 제시하였다.

2.1 Carrier Phase Shifted SPWM

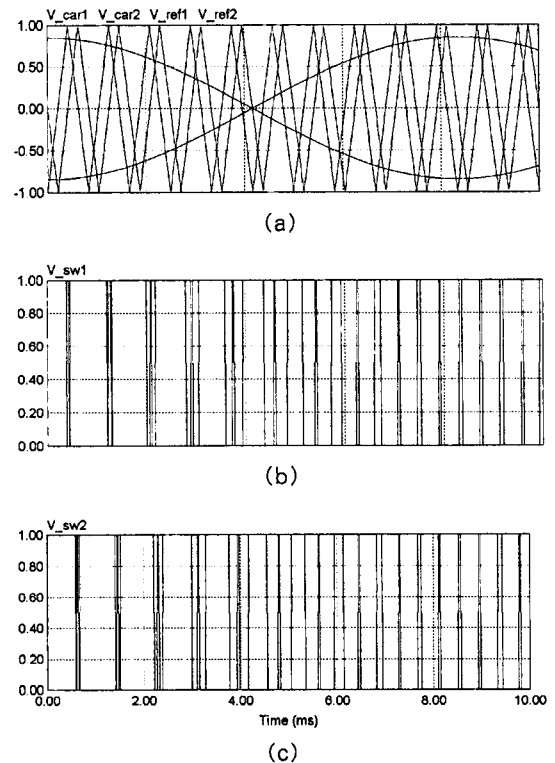


그림 2. Carrier phase shifted SPWM
(a) 두 개의 삼각파 캐리어와 기준 신호
(b) 상위 인버터의 스위칭 신호
(c) 하위 인버터의 스위칭 신호

Fig. 2. Carrier phase shifted SPWM
(a) Triangular carrier wave signal
(b) Upeer inverter switching signal
(c) Down inverter switching signal

그림 2 (a)는 carrier phase shifted SPWM을 나타내고 두 개의 삼각파 캐리어 신호와 기준 신호를 보

Z-소스 인버터의 병렬운전 특성 개선

여주는데 삼각파 캐리어 신호 중 하나는 다른 신호와 비교하여 90° 위상이동 되었다. 그림 2 (b)와 (c)는 각각 상위 인버터와 하위 인버터의 스위칭 신호를 나타낸다. Carrier phase shifted SPWM 기법은 부하에 흐르는 전류에 고조파 성분을 줄이기 위해 적용된다.

고 전력 시스템에서 시스템이 효율적으로 운전하기 위해서는 삼각파 캐리어 신호의 주파수(f_c)와 기준 신호의 주파수(f_r) 비(f_c/f_r)가 낮아야 한다. 고 전력 시스템에서 일반적인 SPWM 기법을 적용하는데 있어서의 단점을 보완하기 위해서 carrier phase shifted SPWM 을 사용한다[2]. 고 전력 병렬운전 시스템에 carrier phase shifted SPWM의 사용은 부하로 흐르는 전류의 고조파 성분을 줄일 수 있으나, Z-소스 인버터 시스템에서 스위칭 시간의 불일치를 야기하기 때문에 순환전류를 발생시킨다.

2.2 순환전류

일반적으로 병렬운전 시스템에서 공통 DC 소스를 사용하는 경우 파라미터와 스위칭 시간의 불일치가 발생할 때 하나의 인버터 출력 전류가 다른 인버터로 흐르게 된다. 다시 말해 두 인버터 시스템은 공통 소스와 부하 사이에 하나의 전원으로 연결되어 각 인버터의 출력 전류가 연결된 또 다른 인버터에 흐르게 된다. 이러한 전류를 순환전류라고 정의한다.

Z-소스 인버터 시스템은 일반적인 인버터 시스템과 비교할 때 많은 장점을 가진다. 그러나 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전의 경우 이러한 순환전류 문제를 갖는다. 특히 Z-소스 네트워크는 시스템이 공동 DC 소스를 가지고 있지 않은 경우에도 순환전류를 흐르게 하는 폐 루프를 형성하는 역할을 한다.

Z-소스 인버터로 구성된 병렬 운전 시스템에서 운전 모드에 따른 전류 흐름은 그림 3과 같다. 순환 전류는 모드 2, 모드 3, 모드 4, 모드 5, 모드 7, 모드 8에서 발생하는데 순환 전류가 발생하는 이유는 풀-브리지에서 하나의 레그의 상위, 하위 스위치가 동시에 턴-온 되어 폐 루프가 만들어지기 때문이다. 특히 모드 2, 모드 4, 모드 7, 모드 8은 인버터 스위칭 소자

중 정격 전류의 두 배인 전류가 흐르게 되어 스위칭 소자가 손상을 입을 수도 있다.

2.3 순환전류의 보상 기법

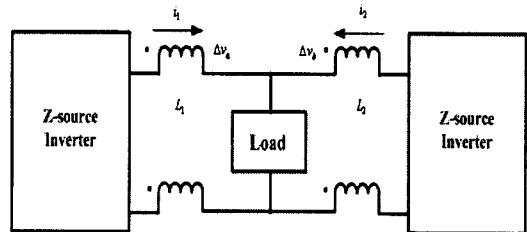


그림 3. 리액터를 포함한 병렬운전 시스템
Fig. 3. Parallel operation system with reactors

각 인버터를 통해 흐르는 순환전류를 감소시키기 위해 리액터를 Z-소스 인버터의 출력단 양단에 설치하였다. 순환전류를 완화하기 위해 리액터를 포함한 병렬운전 시스템을 구성하였다. L1과 L2는 리액터이다. 또한 순환전류를 더욱 감소시키기 위해 커플링 인덕터를 사용한 방법을 추가적으로 제시하였다. 커플링 인덕터의 턴 수가 같다고 가정하면 각 인덕터의 자기 인덕턴스는 같은 값을 가지며 인덕턴스 전압과 전류의 관계는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta v_a &= L_1 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_2}{dt} \\ \Delta v_b &= L_2 \frac{di_1}{dt} - M \frac{di_1}{dt} \end{aligned} \quad (1)$$

만약 전류 i_1 과 i_2 가 같다면 인덕턴스 전압 Δv_a 와 Δv_b 는 다음과 같다. 여기서 M 은 상호 인덕턴스이다.

$$\begin{aligned} \Delta v_a &= (L_1 - M) \frac{di_1}{dt} \\ \Delta v_b &= (L_2 - M) \frac{di_2}{dt} \end{aligned} \quad (2)$$

3. 시뮬레이션 결과

Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템에서 carrier phase shifted SPWM 기법을 사용함으로 발

생하는 순환전류를 완화하기 위한 리액터 사용의 타당성을 확인하기 위해 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

3.1 시뮬레이션 조건

시뮬레이션을 위한 시스템 파라미터는 다음과 같다. $V_{Ideal_fuel_cell}=10[V]$, Z-소스 네트워크 파라미터 $L1=L2=L3=L4=L=930[\mu H]$, $C1=C2=C3=C4=C=1500[\mu F]$ 이다. 변조 지수 M은 0.85로 설정하고, shoot-through 구간 대 스위칭 주기 비율은 $T0/T=0.1014$ 로, 스위칭 주파수는 $1.2[kHz]$ 로 설정한다. 부하는 $10[\Omega]$ 인 저항성 부하이다. 리액터 값은 $3[mH]$ 이다. 부하 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해 각 인버터의 스위칭 시퀀스는 carrier phase shifted SPWM 기법을 사용하였다.

3.2 리액터를 포함하지 않는 병렬운전 시스템

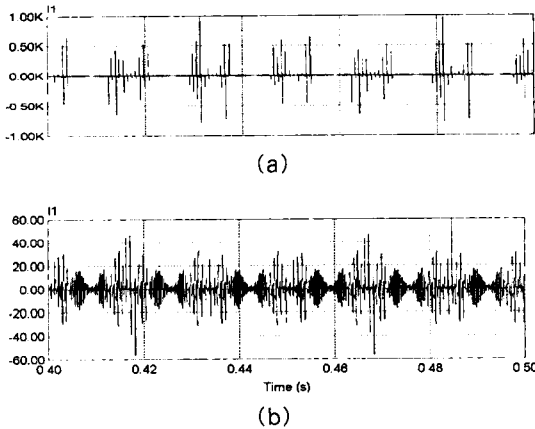


그림 4. 리액터를 포함하지 않았을 때의 순환전류
(a) 순환전류
(b) 확대한 순환전류
Fig. 4. Circulating current without reactors
(a) Circulating current
(b) Enlarged waveform

그림 4 (a)는 carrier phase shifted SPWM을 사용했을 때의 Z-소스 인버터 사이로 흐르는 순환전류를 나타낸다. (b)는 확대된 순환전류를 보인다. 인버터

로 흐르는 순환전류의 피크 값은 $1000[A]$ 정도이다. 만약 이 순환전류가 인버터로 흐르게 되면 인버터 시스템의 스위칭 소자는 파괴될 수도 있다. 그러므로 안정성을 위해 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템에서 부하로 흐르는 전류의 고조파 성분을 줄이기 위해 carrier phase shifted SPWM을 사용 시에 발생하는 순환전류를 감소시켜야 한다.

3.3 리액터를 포함한 병렬운전 시스템

병렬운전에서 carrier phase shifted SPWM을 사용함으로 발생하는 순환전류를 막기 위해 리액터를 각 인버터의 출력단 양단에 설치한다. 그림 6과 7은 carrier phase shifted SPWM를 사용하지 않았을 때와 90° carrier phase shifted SPWM를 사용했을 때의 부하 전류를 나타낸다.

전류 리플은 carrier phase shifted SPWM을 사용했을 때 줄어들을 알 수 있다. 그러나 carrier phase shifted SPWM은 순환전류를 발생시킨다. 그러므로 각 인버터를 통해 흐르는 순환전류를 완화하기 위해 Z-소스 인버터 각 출력단 양단에 순환전류 리액터를 설치한다.

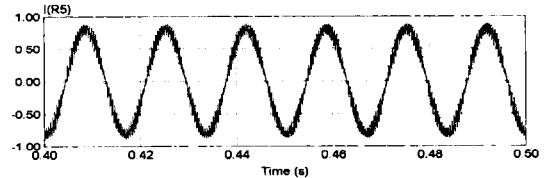


그림 5. Carrier phase shifted SPWM을 사용하지 않았을 때의 부하 전류
Fig. 5. Lode current without carrier phase shifted SPWM

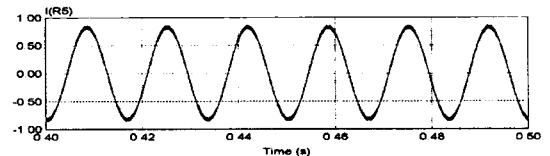


그림 6. 90° carrier phase shifted SPWM을 사용하였을 때의 부하 전류
Fig. 6. Lode current with 90° carrier phase shifted SPWM

Z-소스 인버터의 병렬운전 특성 개선

그림 7은 리액터를 설치하였을 때 인버터 간에 흐르는 순환전류를 나타낸다. (a)는 커플링 인덕터를 사용하지 않았을 때의 감소된 순환전류이고 (b)는 커플링 인덕터를 사용했을 때의 감소된 순환전류이다.

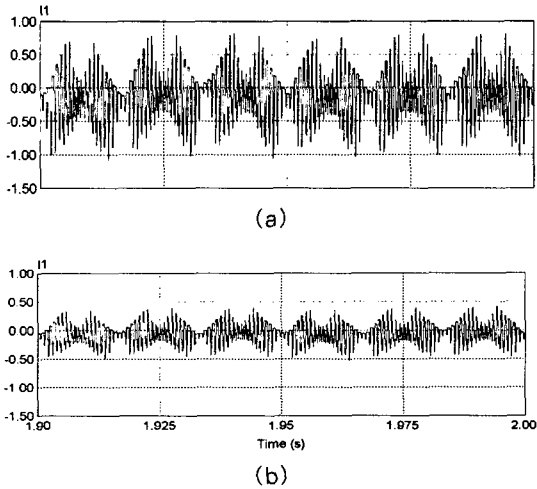


그림 7. 리액터로 감소된 순환전류
(a) 커플링 인덕터를 사용하지 않았을 때의 감소된 순환전류
(b) 커플링 인덕터를 사용하였을 때의 감소된 순환전류

Fig. 7. Reduced circulating current
(a) Without reactors
(b) With reactors

그림 5와 비교할 때 인버터 사이에 흐르는 순환전류는 리액터에 의해 크게 감소함을 알 수 있다. 또한 커플링 인덕터를 사용했을 때가 커플링 인덕터를 사용하지 않았을 때 보다 순환전류의 크기가 두 배 가량 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 리액터에 의해 순환전류가 매우 크게 감소되었고 커플링 인덕터를 사용하면 순환전류를 더욱 감소시킬 수 있다는 것을 의미한다.

완전하게 순환전류를 제거할 수는 없지만 리액터를 통해 그 크기가 줄어들음을 확인할 수 있다.

4. 실험 결과

DSPC31을 이용하여 실험 시스템을 구성하였으며

실험에 사용된 회로소자들의 값은 시뮬레이션과 동일하게 $V_{Ideal_fuel_cell}=10[V]$, Z-소스 네트워크 파라미터 $L1=L2=L3=L4=L=930[uH]$, $C1=C2=C3=C4=C=1500[uF]$ 로 하였다.

그림 8와 9는 리액터를 설치하였을 때, 90° carrier phase shifted SPWM을 사용하지 않았을 때와 사용했을 때의 부하로 흐르는 전류를 나타낸다.

그림 10은 carrier phase shifted SPWM을 사용하였을 때, 인버터 간에 흐르는 순환전류를 나타낸다. (a)는 커플링 되지 않은 인덕터를 사용했을 때의 감소된 순환전류이고 (b)는 커플링 인덕터를 사용했을 때의 감소된 순환전류이다. 순환전류 리액터를 사용하면 순환전류의 크기가 크게 감소함을 볼 수 있고 커플링 인덕터를 사용함으로써 순환전류 감소 효과를 더 개선할 수 있음을 확인할 수 있다.

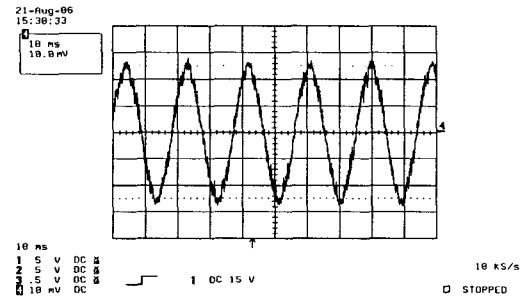


그림 8. Carrier phase shifted SPWM을 사용하지 않았을 때의 부하 전류(200(mA/div))
Fig. 8. Load current without carrier shifted SPWM

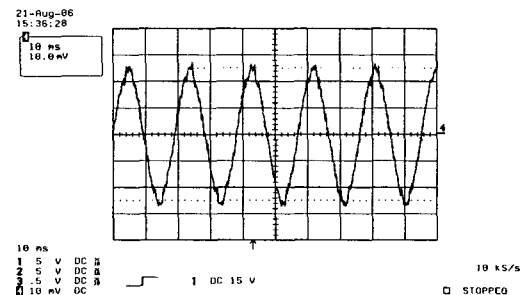


그림 9. 90° carrier phase shifted SPWM을 사용하였을 때의 부하전류(200mA/div)
Fig. 9. Load current with carrier phase shifted SPWM

References

- [1] Fang Zheng Peng, "Z-source inverter", Industry Applications, IEEE Transactions on, Vol. 39, Issue: 2, March-April 2003, Pages: 504-510.
- [2] Z. C. Zhang, etc., "Multi-modular current-source SPWM converter for superconducting magnetic energy storage system", IEEE Trans on PE, Vol.8, No.3, 1993, Pages: 250-256.
- [3] Yu Xiong; Yirhai Zhang, Kun Wei, Zhongchao Zhang, "Carrier phase-shifted SPWM based current-source multi-converter", Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003. APEC '03. Eighteenth Annual IEEE , Vol. 1 , 9-13 Feb. 2003, Pages: 89-93.
- [4] Kawabata, T., Higashino, S., "Parallel operation of voltage source inverters", Industry Applications, IEEE Transactions on , Volume: 24 , Issue: 2 , March-April 1988, Pages: 281-287.

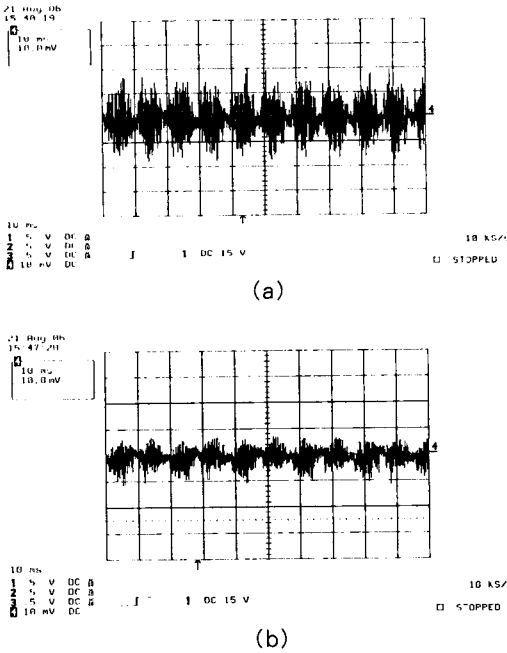


그림 10. 리액터로 감소된 순환전류(1A/div)
 (a) 커플링 인덕터를 사용하지 않았을 때의 감소된 순환전류
 (b) 커플링 인덕터를 사용하였을 때의 감소된 순환전류
 Fig. 10. Reduced circulating current
 (a) Without reactors
 (b) With reactors

5. 결 론

본 논문에서는 Z-소스인버터로 구성된 병렬운전 연료전지 시스템을 위한 순환전류 감소 방안을 제안 하였다. Z소스 인버터에 적용된 Carrier phase shifted SPWM은 부하 전류의 고조파 성분을 줄이는 장점을 갖는다. 그러나 carrier phase shifted SPWM은 병렬운전 시 순환전류를 발생시킴을 확인 하였다. 인버터 출력단의 순환전류를 감소시키며, 부하 전류 고조파 성분을 낮추고, 높은 성능을 유지하기 위해 커플링된 순환전류 리액터를 사용하였다.

시뮬레이션과 실험을 통하여 커플링된 순환전류 리액터가 Z-소스 인버터로 구성된 병렬운전 시스템에서 carrier phase shifted SPWM을 사용함으로 발생하는 순환전류를 추가적으로 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있었다.

◆ 저자소개 ◆

김윤호 (金倫鎬)

1949년 6월 20일생. 1974년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 미국 Texas A&M대학 졸업(박사). 현재 중앙대 전자전기공학부 교수.

이옥영 (李郁泳)

1978년 3월 24일생. 2004년 경원대 전기공학과 졸업. 현재 중앙대 대학원 전자전기공학부 석사과정.

서강문 (徐康文)

1979년 5월 8일생. 2005년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업. 현재 동 대학원 전자전기공학부 석사과정.