Voltage Doubler를 이용한 4-스위치 3상 BLDC 전동기 구동 알고리즘

논 문
60P-1-9

Driving Algorithm on Three Phase BLDC Motor Applied 4-Switch using Voltage Doubler

윤 용 호* · 이 정 석** · 원 충 연†
(Yong-Ho Yoon · Jung-Suk Lee · Chung-Yuen Won)

Abstract - Over the years, traditionally, six-switch three-phase inverters have been widely utilized for variable speed alternating current motor drives. Recently, some efforts have been made on the application of four-switch three phase inverter for uninterruptible power supply and variable speed drives. This is due to some advantages of the four-switch three phase inverter over the conventional six-switch three-phase inverters such as reduced price due to reduction in number of switches, reduced switching losses, reduced number of interface circuits to supply logic signals for the switches, simpler control algorithms to generate logic signals, less chances of destroying the switches due to lesser interaction among switches, and less real-time computational burden. However such as slow di/dt and speed limitation, are the inherent characteristics and main drawbacks of the four-switch configuration. Those problems can be overcome in conjugation with Voltage-doublers which has additional advantage, such as unity power factor correction.

Key Words : BLDC Motor, Sensorless Driving Algorithm, Voltage Doubler

1. 서 론

본 논문에서는 BLDC 전동기 구동회로를 최소화하므로서 전체 시스템의 가격상승에 대한 원가 절감을 이룰 수 있는 방법을 제안하였다. 단상전원으로부터 3상 BLDC 전동기를 구동하기 위하여 교류를 직류로 변환하는 컨버터와 이를 다시 3상으로 변환하는 인버터가 요구된다. 따라서 전력변환장치에 사용되는 전력용 반도체와 센서의 수는 저가의 저전력 구동시스템에서 반드시 고려되어야 한다[1].

일반적으로 3상 BLDC 전동기 구동을 하기 위해서는 다이오드 정류기와 3상 인버터가 결합된 구조의 비교적 스위치의 수가 적고 회로와 제어기법이 간단하다. 하지만 이 경우 역률제어와 직류전압제어가 불가능하며 전원측 전류가 크게 왜곡되어 추가적인 고조파 보상대책이 필요하다. 또한 단순히 원가 절감차원에서 6-스위치를 이용한 구동 방식인 3상 인버터에서 2개의 스위치를 제거한 4-스위치 인버터를 사용하여 3상 BLDC 전동기를 구동을 할 경우 전동기의 속도는 인가되는 전압의 크기에 비례하므로 결국 전동기정격속도의 1/2이상의 속도를 낼 수 없는 문제점을 가지고 있다.

4-스위치 인버터는 전압이용률에 따라 입력전압 전체를 사용하는 그림 2의 모드 1과 입력전압의 절반만을 이용하는 모드 2, 3으로 구분을 질수 있다. 이러한 불평형 전압이용률은 6-스위치 인버터와 비교했을 경우 전동기의 속도제한과 di/dt 성분이 늦어짐으로써 정격속도에 대한 응답성이 떨어지는 문제점이 있다[2].

따라서 본 논문에서는 3상 BLDC 전동기 구동을 위한 방법으로서 4-스위치 인버터의 문제점을 해결함과 동시에 직류전압제어, 입력전류의 정현제어, 단위역률제어 등이 가능한 구조의 형태가 될 수 있는 Voltage doubler를 적용한 구동방식을 제한하였다. 4-스위치 인버터의 경우 출력단 한상이 직류단 중성점에 연결되고 이때 부하전류를 평형으로 유지할 수 있도록 제어해야한다. 또한 6개의 스위치가 1개의 모듈로 구성되는 IPM (Intelligent Power Module) 소자를 사용할 경우 4개의 스위치는 전동기 구동을 위한 4-스위치 인버터로 사용되고 남은 2개의 스위치를 이용하여 Voltage doubler를 구성함으로써 저가형태의 산업용 구동장치로 적용될 수 있다[3].

2. 3상 BLDC 전동기 4-스위치 인버터

2.1 4-스위치 인버터

기존의 6-스위치를 이용한 구동 방식과 달리 4개의 스위치를 이용하는 4-스위치 인버터는 그림 1과 같이 3상 중 2상에 대해 스위치가 구성되고 나머지 1상은 입력 전원측 커패시터의 중성점에 연결되게 된다.

따라서 6-스위치를 이용한 스위칭 패턴을 사용하게 되면 중성점에 연결된 상에 전류가 흐르게 되어 3상이 동시에 도통하는 구간이 발생하게 되고 이를 제거하기 위해서는 별도의 스위칭 방식이 필요하게 되며 그림 2와 같은 모드로 동작이 되며 이 때 적용된 각 모드별로 스위칭 패턴은 표 1과 같이 나타낼 수 있다.

* 정 회 원 : 삼성탈레스 전문연구원 · 공박
** 정 회 원 : 삼성탈레스 수석연구원
† 교신저자 시니어회원 : 성균관대학교 정보통신공학부 정교수 · 공박
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr
접수일자 : 2011년 2월 11일
최종완료 : 2011년 2월 23일

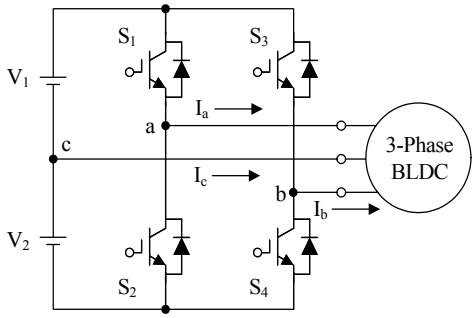


그림 1 BLDC 전동기용 4-switch 인버터
Fig. 1 4-switch inverter for BLDC motor.

표 1 4-스위치 동작을 위한 스위칭 패턴
Table 1 Switching pattern for 4-switch operation.

Mode	Active Phase	Switch On State
1	A, B	S_1, S_4
2	B, C	S_3
3	C, A	S_2

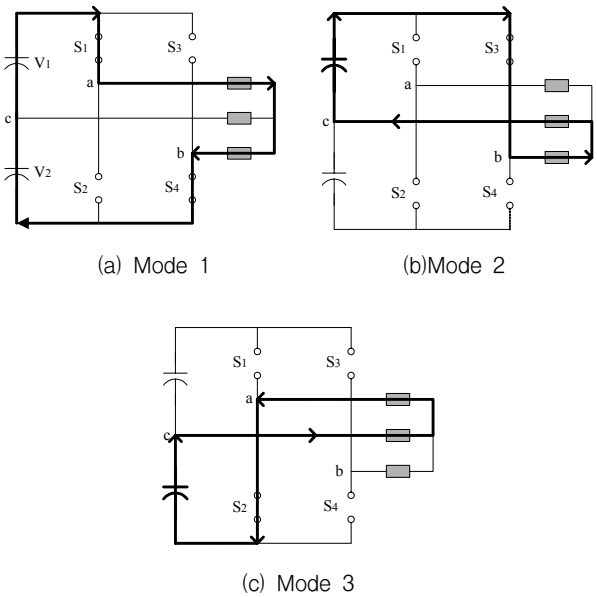


그림 2 동작 모드
Fig. 2 Operating mode.

2.2 Voltage doubler

Voltage doubler의 전력회로는 그림 3과 같이 구성되며 역률을 개선함과 동시에 정현파에 가까운 전류 파형을 입력측에서 얻을 수 있는 기능을 가지고 있다. 또한 전류의 흐름에는 두개의 반도에 소자만 관여하기 때문에 승압초퍼에 의한 보상방식과 비교하여 전압강하를 줄일 수 있고 스위치를 거치는 실효전류의 정격이 낮기 때문에 소자의 크기 및 정격을 줄일 수 있다[5,6].

동작은 4개의 동작모드로 나눌 수 있으며 입력전압 Vs가 양(+)의 반주기 동안 Mode 1과 Mode 2를 반복하고 Vs가 음(-)의 반주기 동안에는 Mode 3과 Mode 4를 반복한다.

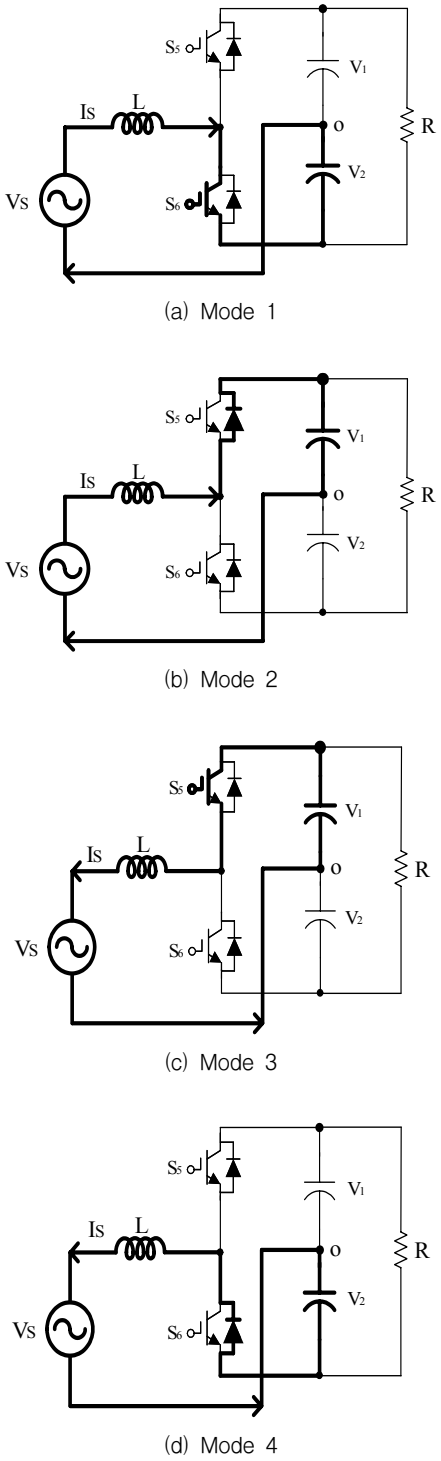


그림 3 Voltage doubler.
Fig. 3 Voltage doubler.

Mode 1은 입력전압의 극성이 양(+)의 반주기일 경우 스위치 S5가 턴-오프되고 S6이 턴-온 상태일 때 전류는 스위치 S6를 통해 흐르며 인덕터에 흐르는 전류는 증가하게 되고 자기 에너지가 저장된다.

커패시터는 초기 충전전압으로 충전이 되어 있고 이 모드에서 방전을 시작하여 부하에 전류를 공급하게 된다. 스위치 S6이 턴-오프 상태일 때 인덕터 L에 저장되어 있던 에

너지는 스위치 S5의 역방향 다이오드를 통해 커패시터를 충전하게 되며 Mode 2와 같다.

입력전압 극성이 음(-)의 반주기일 경우 스위치 S5가 턴-온 되고 S6이 턴-오프 상태일 때 전류는 스위치 S5를 통해 인덕터에 흐르며 인덕터에 자기에너지가 다시 저장된다. 이 때 커패시터는 방전을 시작하여 부하에 전류를 공급하게 되며 Mode 3과 같다. Mode 4는 스위치 S5가 턴-오프 상태일 때 인덕터 L에 저장되어 있던 에너지는 스위치 S6의 역방향 다이오드를 통해 커패시터를 충전하게 된다[7].

3. 시뮬레이션

본 논문에서 제안한 3상 BLDC 전동기 구동을 위한 방법으로서 4-스위치 인버터의 문제점을 해결함과 동시에 직류전압제어, 입력전류의 정현제어, 단위역률제어 등이 가능한 구조의 형태가 될 수 있는 Voltage doubler를 적용하기 위한 전체 시스템 구조는 그림 4와 같이 나타낼 수 있고 PSIM 소프트웨어를 이용하여 제안한 내용의 타당성을 검증하였다.

표 1은 4-스위치 인버터의 스위칭 시퀀스를 나타내는 것으로서 각 모드에서의 여자되는 두상의 전류의 합은 '0'이다. 모드 1의 경우, S1 and S4가 온이 되어 A상과 B상에만 전류가 흘러야 하지만 실제 V2에서 모터 중성점으로 전류가 흐르는 현상이 발생한다. 따라서 A, B상을 독립적으로 제어하지 않을 경우에는 C상에 전류가 흐르게 된다. 이러한 문제점의 해결하기위해 그림 5에서 보는바와 같은 중성점의 불균형을 보상하기 위한 방식을 적용하였다.

표 2는 시뮬레이션에 적용된 BLDC 전동기 사양을 나타내며 회전자 위치 파악을 위하여 3개의 Hall-sensor를 사용하여 위치를 판별하고 전류 리플을 최소화 하기위하여 히스테리시스 전류제어기를 적용하였다. 또한 Voltage doubler의 입출력 사항은 입력전압 110V에 출력전압 V1, V2에 각각의 전압이 280V가 출력이 되도록 설계하였다.

그림 6은 그림 1과 같이 4-스위치 인버터만을 적용하여 3상 BLDC 전동기를 30,000rpm으로 구동하였을 경우 각상의 전류파형으로써 A, B, C 각상의 전류파형은 불평형 전압 이용률의 영향을 받아 전류제어가 정확히 되지 않아 전체적으로 시스템이 불안정한 현상을 나타냄을 보여주고 있다.

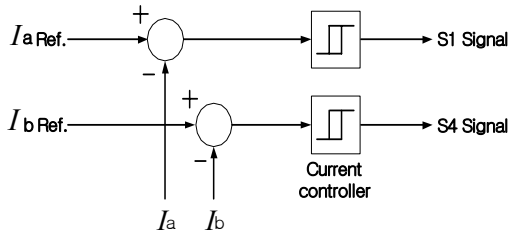


그림 5 중성점의 불균형을 보상하기 위한 PWM
Fig. 5 PWM strategy for balancing of neutral point.

표 2 BLDC 전동기 구동 시스템 사양
Table 2 Specification of BLDC Motor's driver.

입력 전압	$90V_{dc}$ ~ $340V_{dc}$
정격 입력 전력	1kW
정격 출력 전력	0.9kW
정격 속도	33000[rpm]
정격 전류	3.6A at $280V_{dc}$
극 수	2

그림 6 4-스위치 인버터에 의한 3상 BLDC 전동기 구동시 A, B, C 상전류 (3.5A/div., 30000rpm)
Fig. 6 Phase current with 4-switch inverter for BLDC Motor.

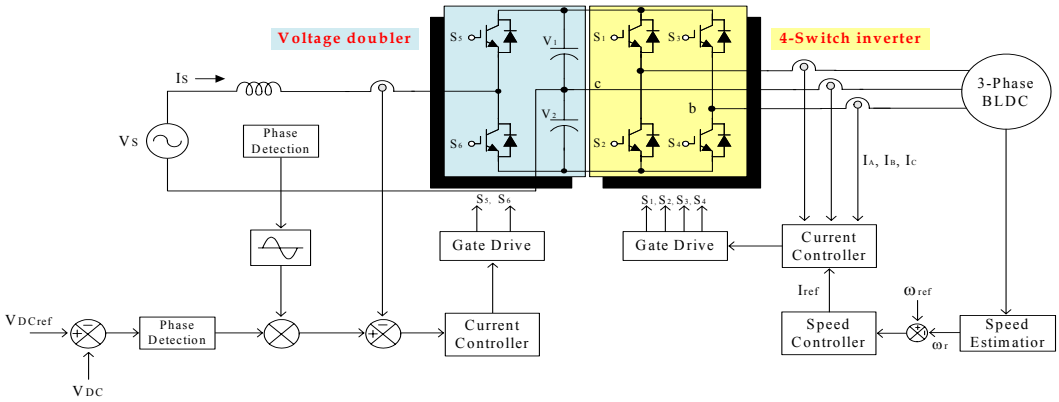


그림 4 제안된 BLDC 구동시스템
Fig. 4 Proposed driving BLDC system.

이러한 현상은 3상 BLDC 전동기를 구동을 할 경우 전동기의 속도는 인가되는 전압의 크기에 비례하여 결국 전동기 정격속도의 1/2이상의 속도를 낼 수 없다는 4-스위치 인버터의 단점을 보여주고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 개선하고자 Voltage doubler를 4-스위치 인버터 앞단에 적용하여 그림 7과 같이 입력단의 전압 및 입력전류의 정현제어, 단위역률제어 등이 가능한 구조의 형태가 됨을 보여주고 있다.

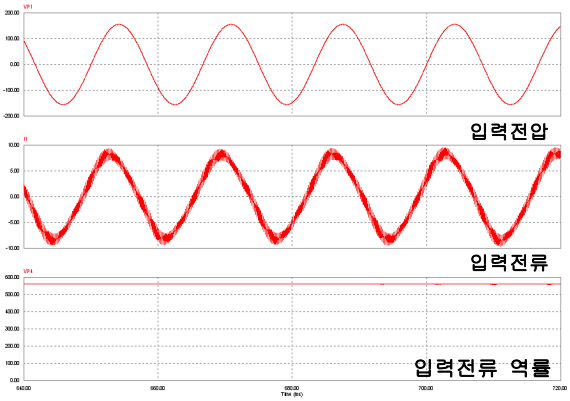


그림 7 Voltage doubler를 적용하였을 경우 입력전압 및 입력전류, 입력전류의 역률

Fig. 7 Input Voltage, current and PFC of Input current with Voltage doubler.

Voltage doubler의 입력단의 전압은 상용전압 110V이며 출력단 전압 즉 2개의 직렬 캐패시터 양단에 560V(280V + 280V)가 출력이 되도록 설계하여 그림 2의 모드 2와 3에서도 전동기에 인가되는 전압이 3상 BLDC 전동기에 최소 정격입력전압이 전달된다.

그림 8은 그림 7의 입력전류에 대한 FFT 분석의 결과를 나타낸 파형으로써 기본파와 3차 고조파가 함유된 것을 확인할 수 있으며 Voltage doubler를 사용함으로써 입력전류에 대한 정현제어 및 단위역률제어에 따른 고조파 저감 효과를 기대할 수 있다.

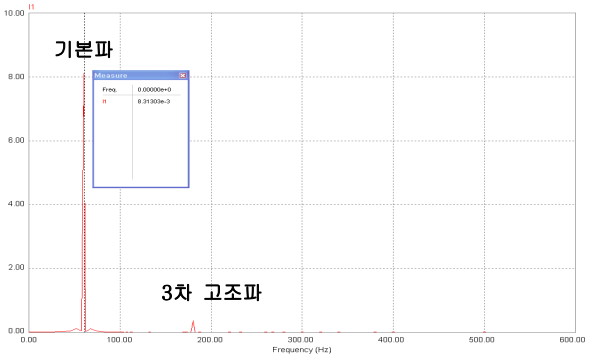


그림 8 Voltage doubler의 입력전류 FFT 분석

Fig. 8 FFT analysis of input current of Voltage doubler.

그림 9는 Voltage doubler를 적용시 3상 BLDC 전동기를 30,000rpm으로 구동하였을 경우 상전류와 기준속도에 따른 속도응답특성을 보여주고 있으며 그림 10은 30,000rpm 구동시 A, B, C 각상의 전류파형을 나타내고 있다.

그림 4에서 4-스위치 인버터만을 적용하여 3상 BLDC 전동기를 구동 할경우의 전류파형과 달리 BLDC 전동기에 전달되는 정격전압의 에너지로 인해 안정된 전류제어가 이루어짐을 확인할 수 있다.

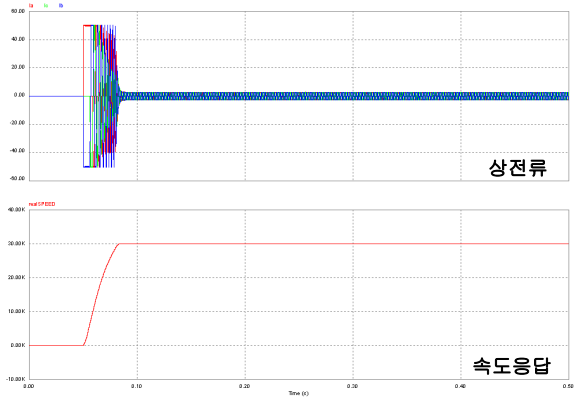


그림 9 Voltage doubler 적용시 상전류와 속도응답

Fig. 9 Phase current and speed waveform with Voltage doubler.

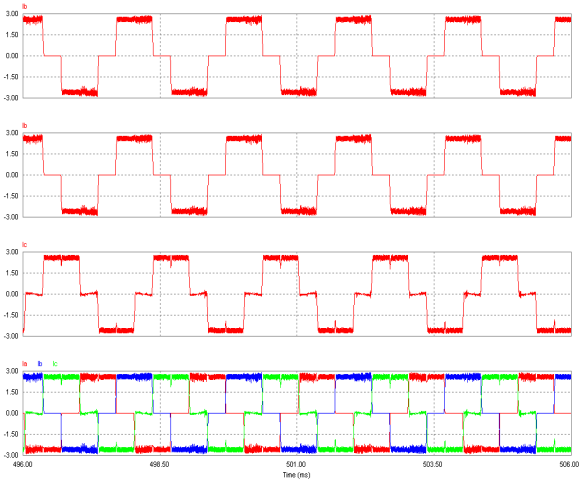


그림 10 A, B, C 상전류 (1A/div., 30000rpm)

Fig. 10 Each phase current.

4. 결 론

본 논문에서는 최근 가전용 기기에 많이 적용되고 있는 BLDC 전동기 구동 회로에 소모되는 비용을 절감하여 전동기 제작비용 상승으로 인한 전체 시스템의 경비 상승을 줄이기 위한 방법을 제안하였다.

단상전원으로부터 3상 BLDC 전동기를 구동할 수 있는 저가형 4-스위치 인버터를 적용할 경우 발생되는 전동기의 속도제한, di/dt 성분에 따른 정격속도에 대한 응답성이 떨어지는 문제점을 개선하고자 Voltage doubler를 적용한 구동방식을 제한하였다. 따라서 입력전류의 정현제어, 단위역률제어, 직류출전압제어가 가능하여 인버터 시스템이 갖는 장점 및 전체적인 시스템의 신뢰도를 향상시킬 수 있다.

참 고 문 헌

[1] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, Design of Brushless Permanent-Magnet Motors, Oxford, UK: Oxford Science, 1994.

[2] Byoung-Kuk Lee, Tae-Hyung Kim, and Mehrdad Ehsani, "On the Feasibility of Four-Switch Three-Phase BLDC Motor Drives for Low Cost Commercial Application: Topology and Control", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.18, no.1, pp.164-172, 2003, January.

[3] M. Nasir Uddin, Tawfik S. Radwan, M. Azizur Rahman, "Fuzzy-Logic-controller-Based Cost-Effec-tive Four-Switch Three-Phase Inverter-Fed IPM synchronous Motor Drive System", IEEE Trans. Ind. Application, vol.42, no.1, pp.21-30, 2006.

[4] 김태윤, 이지명, 석줄기, 이동춘, "유도전동기 구동을 위한 저가형 단상-3상 AC/DC/AC PWM컨버터", 전력전자학회 논문지, vol.7, no.4, pp.322-331, Aug. 2002.

[5] Jae-Woo Lim, Bong-Hwan Kwon, "A power-Factor Controller for Single-Phase Pwm rectifers", IEEE Trans. Ind. Electronics, vol.46, no.5, pp.1035-1037, 1999.

[6] J. I. Itoh and K. Fujita, "Novel Unity Power Factor Circuits using Zero-Vector Control for Single-Phase Input Systems", IEEE Trans. on Power Electronics, vol.15, no.1, pp.36-43, 2000.

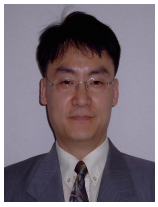
[7] 전영수, 백승택, 김희중, 한병문, "단상 PWM 컨버터의 역률 및 고조파 보상을 위한 교류전압 검출기가 없는 새로운 제어기", 대한전기학회 학술대회논문집, 전기기기 및 에너지변환시스템부문, pp.161-165, 2003.

저 자 소 개

윤 용 호(尹 溶 湖)

2002년 성균관대 메카트로닉스공학과 졸업(석사). 2002년~2003년 LG전자 연구원. 2007년 2월 동 대학원 졸업(공박). 2007년 2월~현재 삼성탈레스(주) 종합연구소 전문연구원.

Tel : 031-8020-7569
Fax : 031-8020-7889
E-mail : yongho.yoon@samsung.com



이 정 석(李 正 碩)

1990년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1990년 1월~1995년 2월 삼성전기 전력변환팀 선임연구원. 1995년 3월~1997년 11월 삼성종합기술원 의료기기연구실 전문연구원. 1997년 2월~현재 삼성탈레스(주) 종합연구소 수석연구원.

Tel : 031-8020-7562
Fax : 031-8020-7350
E-mail : js4300.lee@samsung.com

원 충 연 (元 忠 淵)

성균관대학교 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 공대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1991년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988~현재 한국 철도기술연구원 심사위원. 2006년~현재 한국전력공사 PQ 심사위원. 2006년~현재 차세대 첨단도시철도시스템(한국건설교통기술평가원) 기술개발사업 운영위원. 현재 성균관대 정보통신공학부 교수.

Tel : 031-290-7115
Fax : 031-299-4623
E-mail : won@yurim.skku.ac.kr