한국ITS학회논문지
제8권, 제6호 (2009년 12월)
pp. 173~179

수퍼 커패시터의 고장진단을 위한 파라미터의 측정기법과 순시전압강하 보상장치에의 응용사례

Parameter Measurement Method for Super Capacitor Failure Diagnosis and Application of Voltage Sag Compensation System Using Super Capacitor

손 진 근*
(Jin-Geun Shon)

요 약

본 논문에서는 순시전압강하 보상장치 등의 전력변환시스템에 사용되는 수퍼 커패시터(또는 전기이중층콘덴서; EDLC)의 고장진단을 위한 파라미터의 측정기법에 관한 연구를 수행하였다. 직류 에너지의 저장을 위한 기존의 장치에는 납축전지 또는 전해 커패시터를 사용하여 왔으나 환경문제 및 에너지밀도의 측면에서 불리하여 최근에는 수퍼 커패시터의 사용이 주목을 받고 있다. 따라서 본 논문에서는 이러한 수퍼 커패시터의 내부 특성 및 고장 마모 등을 분석하기 위한 커패시터의 등가직렬저항(ESR) 및 정전용량을 측정하는 기법을 제시하여 고장진단의 주요한 데이터에 활용이 가능토록 하였으며, 또한 수퍼 커패시터를 적용한 순간전압강하에 대한 응용 실험을 수행하여 그 결과를 함께 제시하였다.

Abstract

Recently, the super capacitor(EDLC) which has drawn attention as a new energy storage element has a lot of advantage such as no maintenance, long lifetime and quick charge/discharge characteristics with large current. The objective of this paper is propose a parameter measurement method to detect the changes in equivalent series resistor (ESR) and the capacitance value of a super capacitor in order to analysis the internal characteristic and worn-out state of a super capacitor. For proposed method, only the capacitor voltage measurement using simple analog switch is required. In addition, experimental results of voltage sag compensation system in order to compensate the input voltage drop during short-term power interruption adopted super capacitor are presented.

Key words: Super capacitor, EDLC (electric double layer capacitor), parameter measurement, equivalent series resistor(ESR), voltage sag, worn-out

---

† 이 연구는 2009학년도 경원대학교 지원에 의한 결과이며 또한 지식경제부(에기평)의 2008/9년도 '전력산업연구개발사업'의 연구 지원에 의하여 연구 수행된 내용의 일부임.
* 주저자 : 경원대학교 공과대학 전기공학전공 부교수
† 논문접수일 : 2009년 11월 11일
† 논문심사일 : 2009년 12월 22일
† 게재확정일 : 2009년 12월 24일

Ⅰ. 서 론

배전계통에서 순간적인 정전 및 순시적 전압강하에 대한 피해를 최소화하는 장치로써는 납축전지를 이용한 무정전전원장치(uninterruptible power supply; UPS)나, 알루미늄 전해커패시터를 이용한 동적전압보상장치(dynamic voltage restorer ; DVR)가 이용되고 있다. UPS는 납축전지의 고 에너지 밀도를 이용하여 정전 등 장시간(약 5~15분 정도)의 보상을 수행하는 경우에 유리하지만 전지의 수명이 짧아 유지보수의 문제점이 있고 환경적 측면에서 악영향을 끼치게 된다. 또한 알루미늄 전해커패시터를 이용한 DVR은 급속 충방전이 가능하고 가격이 저렴하지만 에너지 밀도가 낮고 폭발의 위험이 있다는 문제점이 제기되고 있다[1,2].

이러한 소자에 비하여 수퍼 커패시터(또는 전기이중층콘덴서(EDLC)라 칭함)는 납축전지와 전해 커패시터의 장점들은 그대로 유지하면서 에너지 축적용량, 수명 및 안전성 등의 단점을 보완할 수 있기 때문에 최근에는 UPS 및 DVR 등의 전압보상장치의 사용에 그 수요가 늘어나고 있는 추세에 있으며 하이브리드 전기자동차 등의 전력저장장치에도 널리 이용되리라 예상된다[3-5].

따라서 본 논문에서는 이와 같이 각종 전력변환장치에 이용 확대가 예상되는 수퍼 커패시터에 대한 특징을 고찰하여 보고 커패시터 내부의 등가직렬저항(ESR) 및 정전용량의 측정기법과 그 실험결과를 제시하고자 한다. 측정된 실험결과는 전력변환시스템의 손실 및 보상시간의 결정[6]에 활용할 수 있으며 커패시터의 사용 반복에 따른 열화의 정도 및 고장진단에 대한 기초 데이터로 활용 가능하다. 또한 본 논문에서는 이러한 수퍼 커패시터를 이용하여 순간정전에 대한 UPS 및 순시전압강하에 대한 DVR 시스템에서의 구성 사례 및 그 실험 결과를 제시하여 수퍼 커패시터에 대한 활용성을 검토해 보기로 한다.

Ⅱ. 전력에너지 저장장치의 비교

1. 기존 에너지 저장치의 검토

전력에너지 저장장치로 널리 이용되는 납축전지는 대용량 저장이 가능하기 때문에 매우 유용하게 사용되어 왔으나 환경에 취약하고 충·방전속도가 매우 느리며 수명이 낮아 주기적인 유지보수가 필요하다는 단점이 있다. 또한 전해커패시터는 에너지 저장능력이 매우 낮아 전압 보상시간이 아주 짧고, 높은 리플전류에 의한 전력 손실 및 온도 상승 등으로 인하여 폭발의 위험성에 노출되어 있다. 이러한 두 종류에 대한 전력 저장장치로서의 문제점은 <표 1>과 같이 나타낼 수 있다.

<표 1> 기존 에너지 저장장치의 문제점
<Table 1> Problems of conventional energy storage system.

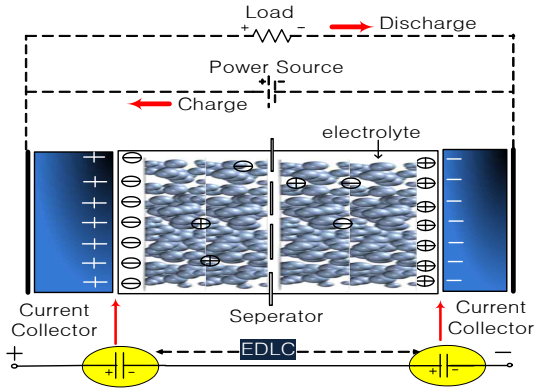
종 류	문 제 점
납축전지	• 충·방전 횟수에 따라 용량감소 • 대형화될수록 폐기물이 증가되어 환경문제에 영향
	• 사용온도의 상한이 낮음 • 저온시 보호회로의 안전성 확보가 어려움
	• 효율이 낮음
전해커패시터	• 리플전류에 의한 전력손실
	• 온도가 높아지면 수명이 감소 • 등가직렬저항(ESR)이 증가하여 누설전류 커짐
	• 전기화학 반응에 의한 전도도 저하와 화학적 변질 및 증발현상 • 가연성 재료

2. 수퍼 커패시터의 특성

수퍼 커패시터는 일명 '전기이중층콘덴서' 라고도 불리우는 친환경적 에너지 저장장치이다. 이는 표면적이 매우 넓은 다공질의 활성탄소를 분극성 전극에 응용하는 전기이중층콘덴서와 고분자나 산화물재료를 이용하는 의사((Pseudo)커패시터가 있으나 상용화된 제품은 주로 전기이중층콘덴서이므로 이를 통상 수퍼 커패시터라 부르게 된다. 이는 전해 커패시터보다 정전용량이 수백 배 이상 크다는 장점이 있다. 또한 배터리는 비교적 작은 부피와 중량으로 많은 에너지를 저장할 수 있으나 이는 종류와 무관하게

저장효율 및 온도특성, 사이클 수명이 낮다는 단점을 갖고 있다[2].

그러나 수퍼 커패시터는 배터리보다 저장할 수 있는 에너지는 작지만 아주 짧은 시간동안의 순시 피크 전력을 공급할 수 있는 능력이 배터리의 10 배에서 100 배 이상이므로 수 초 또는 수 시간 에너지를 저장하고 있다가 큰 전력이 필요할 경우 에너지를 공급할 수 있다.



<그림 1> 수퍼 커패시터의 동작 구조
<Fig. 1> Operational structure of super capacitor

<표 2> 각 에너지 저장장치의 특성비교
<Table 2> Comparison in characteristics of each energy storage system.

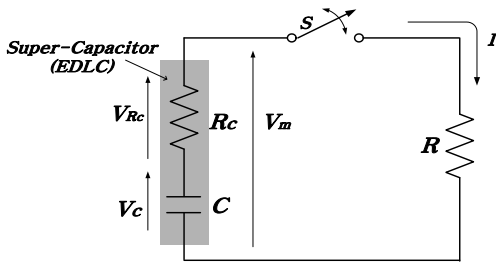
특징 \ 종류	전해 커패시터	EDLC	납축전지
방전시간	수초	수초~수(십)분	수시간
충전시간	수초이내	수(십)초이내	수시간
에너지밀도 (Wh/kg)	~0.1	2~10	20~100
출력밀도 (W/kg)	10,000이상	1,000~2,000	50~200
충·방전효율 (%)	90~98	90~95	70~85
작동온도(℃)	-25~65	-40~90	-20~70
작동전압 (VDC)	6.3~450	1~5.5	~2.5(3.0)
수명	2~10년	20년 정도	3~5년 정도

특히, 수퍼 커패시터는 전기를 저장하는 메커니즘이 화학반응을 이용하는 배터리와 달리 전해질의 계면에 형성되는 이온층에 전하를 저장하므로 즉, 물리적인 전하의 축적에 의한 축전현상을 이용하므로 반복 사용에 따른 열화현상이 심하지 않아서 정격 온도 및 전압의 사용범위 내에서는 수명에 큰 제한이 없고 독성물질도 포함하지 않는 환경친화형 제품이라 할 수 있다[1,2]. 이에 대한 동작 구조와 그 특성 비교결과를 <그림 1>과 <표 2>에 각각 나타내었다[6,7].

Ⅲ. 수퍼 커패시터의 파리미터 측정

1. 수퍼 커패시터의 파라미터 측정기법

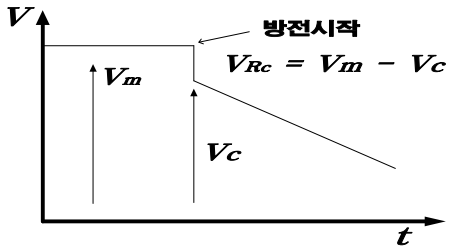
<그림 1>과 같은 수퍼 커패시터의 동작 구조는 <그림 2>와 같이 RC 시정수 회로로 간략하게 등가모델화 할 수 있다. 또한 이때의 등가직렬저항 ESR 및 정전용량은 <그림 2>와 같은 회로구성으로 측정할 수 있다. 이러한 수퍼 커패시터의 파라미터는 온도 변화 및 열화의 정도에 따라 이의 동작에 대한 특성변화 및 전력변환기의 보상시간, 손실의 정도를 결정하므로 매우 중요한 내부 정수가 될 수 있다.



<그림 2> 수퍼 커패시터의 등가 및 측정 회로
<Fig. 2> Equivalent and Measurement Circuit of super capacitor

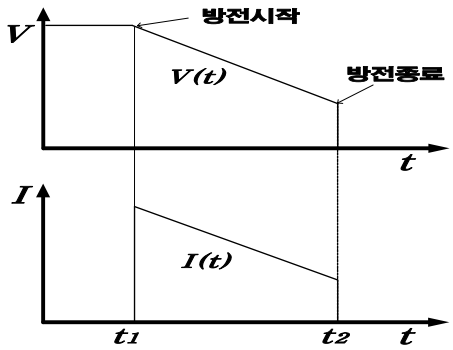
제작사에서 제시한 사양은 제작과정에서 이미 최대 약 20[%]의 오차를 갖을 수 있으며, 열화 정도에 따라 그 값이 변화하므로 별도로 이를 측정하는 것이 타당할 수 있으며, 이의 결과에 근거하여 고장진단시스템

이나 전력변환기기의 설계과정에 적용할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 이들의 사양에 대한 내부 파라미터 측정기법을 제시하고자 하며, 이의 측정회로 및 전압측정의 파형예시를 <그림 3>에 나타내었다.



<그림 3> ESR 측정을 위한 방전전압
<Fig. 3> Discharge voltage for ESR measurement

<그림 2>의 회로에서와 같이 수퍼 커패시터 뱅크는 평상시 일정전압 V_m을 충전하고 있다가 스위치 S 및 부하저항 R을 연결하여 스위치를 온 시키면 방전이 시작된다. 이때의 방전 계단 전압은 <그림 4> 같이 표현할 수 있으며, 수퍼 커패시터의 ESR R_C는 커패시터의 하강전압 V_{R_C}의 관계식 (1) 및 식 (2)를 이용하여 얻을 수 있다. 이는 식 (1)의 관계, 즉 미리 충전된 커패시터의 전압 V_m과 스위치 S를 닫는 후의 부하전압 V_C를 측정하여 V_{R_C}와 이때의 방전전류 I를 측정하는 것에 의하여 식 (2)와 같이 구할 수 있다.



<그림 4> 커패시턴스 C값 측정을 위한 전압/전류 파형
<Fig. 4> Voltage/Current waveforms for capacitance C measurement

$$V_{R_C} = V_m - V_C \tag{1}$$

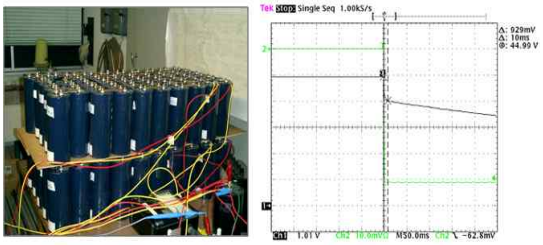
$$R_C = \frac{V_{R_C}}{I} \tag{2}$$

또한, 수퍼 커패시터의 정전용량 C[F]는 커패시터에 축적된 에너지 U의 관계에 의하여 방전시작 시간 $t1$ 및 방전 종료시간 $t2$ 에서의 전압/전류를 측정하여 식 (3)과 같이 축적에너지를 구하고 이를 식 (4)와 같이 정리하여 C값을 구할 수 있다.

$$U = \int_{t1}^{t2} V(t)\, I(t)\, dt = \frac{1}{2} CV(t1)^2 - \frac{1}{2} CV(t2)^2 \tag{3}$$

$$C = \frac{2U}{V(t1)^2 - V(t2)^2} \tag{4}$$

2. 수퍼 커패시터의 파라미터 측정 결과



<그림 5> 수퍼 커패시터 뱅크 및 측정 파형
<Fig. 5> Capacitor bank and measurement waveform

<표 3> 내부저항(R_C)의 측정 결과
<Table 3> Measurement results of ESR R_C

부하저항 R[Ω]	내부저항 R_c[mΩ] (커패시터의 합성저항)	1개당 내부저항 R_{cu}[mΩ]
1.0	155.5	2.22
0.9	151.2	2.16
0.8	154.2	2.20
0.7	155.3	2.22
0.6	150.8	2.15
0.5	144.1	2.06
평균	151.8	2.17

본 측정 실험에서는 2.3[V]의 내압 및 6,000[F]의 정전용량을 가진 M사의 수퍼 커패시터 70개를 직렬로 접속하여 160[V], 85.7[F]으로 단위 모듈화 시켜 <그림 3>과 <그림 4>를 이용하여 측정 실험을 수행하였다. <그림 5>는 이의 측정에 대한 수퍼 커패시터 뱅크 및 측정 실험파형의 일례를 나타낸 것이며, <표 3> 및 <표 4>는 이의 결과를 나타낸 것이다.

<표 4> 정전용량 C의 측정 결과
<Table 4> Measurement results of capacitance C

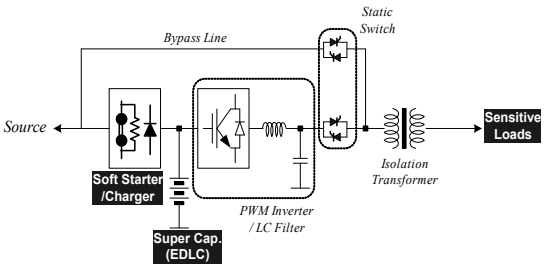
부하 P[W]	정전용량 C[F]	1개당 정전용량 C_a[F]
90	74.3	5202
180	73.7	5158
270	73.7	5160
360	74.0	5178
평균	73.9	5175

Ⅳ. 수퍼 커패시터의 응용 사례

1. 온라인형 UPS

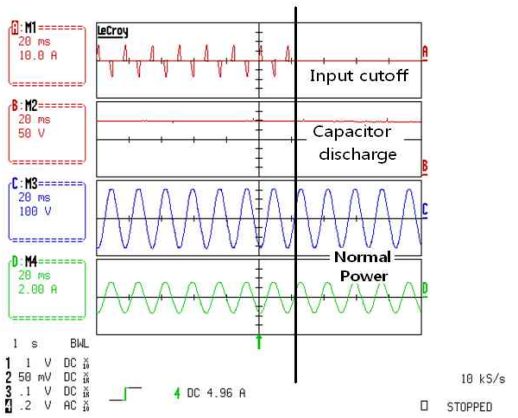
또한 본 논문에서는 전력변환장치의 시스템 구성에 대해서 수퍼 커패시터의 응용사례 및 실험 결과를 나타내었다. 배전계통에서 순간적인 정전 및 순시적 전압강하에 대한 피해를 최소화하는 장치로써는 온라인형 UPS와 오프라인형 DVR의 도입이 효과적이라 할 수 있으며[5], 이에 대한 전압보상장치로써의 에너지 저장장치는 둘 다 수퍼 커패시터를 채용하여 정전 등의 전압을 보상할 수 있다[6].

<그림 6>은 수퍼 커패시터를 채용한 온라인형 UPS의 동작에 대한 블록다이어그램을 나타낸 것이며, <그림 7>은 이의 실험적인 동작파형을 나타낸 것이다. <그림 6>의 입력 전원(source)이 차단(Input cutoff)되면 <그림 7>의 채널 A와 같이 다이오드정류기의 입력전류가 차단(가동후 약 6[s])되며, 이때 미리 충전된 커패시터는 채널 B와 같이 방전(discharge)하기 시작하며, 전원의 부하단에서는 정전과 상관없이 채널 C,D와 같은 전압 및 전류파형으로 정상공급



<그림 6> 수퍼커패시터를 이용한 온라인형 UPS의 구성
<Fig. 6> Configuration of on-line type UPS using the super capacitor

(Normal Power)되는 동작 실험파형을 <그림 7>에 나타내었다.

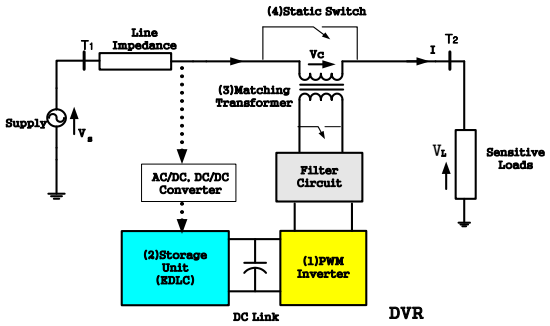


<그림 7> 온라인형 UPS의 동작파형
<Fig. 7> Operational waveform of on-line type UPS

2. 오프라인형 DVR

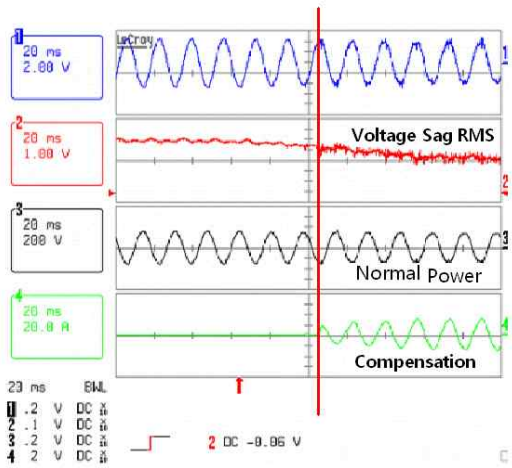
<그림 8>은 수퍼 커패시터를 채용한 오프라인형 DVR의 동작에 대한 블록다이어그램을 나타낸 것이다. 이러한 순시전압강하의 보상장치는 정상전원 입력시에는 절환(static) 스위치가 상시 ON동작을 유지하고 있다가, 전원이상시 이의 스위치를 OFF로 절환하고 수퍼 커패시터의 에너지저장에 의해서 전력을 DC/AC로 전력변환(PWM 인버터)하여 매칭변압기를 통하여 이를 부하에 공급하는 체계로 구성되어 있다. <그림 9>은 이의 실험적인 동작파형을 나타낸 것이

다. <그림 9>의 입력 전원에 순시전압강하(voltage sag)가 <그림 9>의 채널 2와 같이 발생되면 이때 미리 충전된 커패시터의 에너지에 의하여 DVR은 채널 4와 같이 동작하여 부하단에서는 채널 1,3과 같이 정상공급(Normal Power)되는 동작 실험파형을 <그림 9>에 나타낸 것이다.



<그림 8> 수퍼커패시터를 이용한 오프라인형 DVR 구성

<Fig. 8> Configuration of off-line type DVR using the super capacitor



<그림 9> 오프라인형 UPS의 동작파형

<Fig. 9> Operational waveform of off-line type DVR

V. 결 론

수퍼 커패시터는 알루미늄 전해커패시터와 납축전지의 장점들을 그대로 유지하면서 에너지의 축적용량 및 장수명의 장점과 환경성 및 안전성 등 두기존의 에너지 저장장치에 대한 단점을 보완한 에너지 저장장치이다. 이러한 장점 때문에 수퍼 커패시터는 고가임에도 불구하고 UPS 및 DVR 등과 같은 전압보상장치 및 하이브리드 전기자동차, 태양광 발전시스템과 같은 전력변환 시스템에 적용이 확대되고 있다.

따라서 본 논문에서는 수퍼 커패시터 특성 및 열화의 진행 정도를 파악하기 위한 내부저항 및 정전용량 산출기법을 제시하여 실험하였다. 파라미터 특성실험에서는 부하(P) 변화에 따른 정전용량(C)변화가 부하저항(R) 변화에 대한 내부저항(R_c) 변화 보다 둔감하게 분석되었으나 평균적으로 큰 오차는 없었다. 따라서 이러한 파라미터 산출기법은 커패시터에 대한 열화의 진행 정도 및 전력변환시스템의 종합적인 고장진단 시스템의 구축에 대한 기초 자료로 활용 가능하리라 사료된다.

또한 본 논문에서는 이러한 수퍼 커패시터를 채용하여 순간 정전에 대해서는 UPS를 구성하였고, 순시전압강하에 대해서는 DVR를 구성하여 이의 동작 실험 결과를 제시하여 다양한 전력변환장치에서의 수퍼 커패시터에 대한 활용성을 고찰하여 보았다.

참 고 문 헌

[1] Florida Educational Seminars, Inc., *The 10th International Seminars on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices*, Dec. 2001.

[2] Y. Kim, "Ultracapacitor technology power electronics circuits", *Power Electronics Technology*, (http://powerelectronics.com/mag/power_ultracapacitor_technology_powers/), pp. 34-39, Oct. 2003.

[3] D. M. Vilathgamuwa, A. A. D. R. Perera, and S. S. Choi, "Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 928-936, July 2003.

[4] W. E. Brumsickle, R. S. Schneider, G. A. Luckjiff, and M. F. Granaghan, "Dynamic sag corrector :

cost effective industrial power line conditioning," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 37, no. 1, pp. 212-217, Jan/Feb. 2001.

[5] A. Ghosh and G. Ledwich, "Compensation of distribution system voltage using DVR," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 1030-1036, Oct. 2002.

[6] 손진근, 전희종, "친환경 Ultra-capacitor에 의한 순시전압강하의 직렬전압보상 시스템," *대한전기학회 논문지*, 제58권, 제4호, pp. 763 - 769, 2009. 3.

[7] Matsushita Electronic Components Co, *Technical guide of aluminum electrolytic capacitors*, Mar. 2000.

저자소개

손 진 근 (Shon, Jin-Geun)

1990년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학사
1992년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학석사(전력전자전공)
1997년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학박사(전력전자전공)
2002년 2월 ~2003년 2월: 일본 가고시마대학 해외 Post-Doc.
1997년 3월~현재 : 경원전문대학/경원대학교 전기공학과 교수
관심분야 : 전기품질(Power Quality), 전동기제어, 능동전력필터