

Development of Dynamic Voltage Restorer System Considering Characteristics of EDLC

이 상 철[†] · 서 일 동*
(Sang-Cheol Lee · Il-Dong Seo)

Abstract - Recently, in energy storage system, the EDLC is paid attention as a new environmentally friendly energy storage element. This capacitor has higher energy density than the electrolytic capacitor. Also, this capacitor has a lot of advantage such as no maintenance, longer life cycle and faster charge-discharge time than the battery system. But the EDLC must have a each charge-discharge controller to effectively control, an energy design method circuit to use effectively energy, and several compensation techniques to control a optimal operating.

In this respect, this study suggests major parameters to effectively represent the characteristics of EDLC, the measurement methods of those parameters have been investigated with experiments, and the interpretation about the buck/boost DC/DC converter for the operation of EDLC.

Key Words : EDLC(Electric Double Layer Capacitor), DVR(Dynamic Voltage Restorer), On-Line and Off-Line Type, Power Quality

1. 서 론

전기품질의 문제가 주요 관심사항으로 급격히 대두되고 있는 이유는 전압의 순시변동 및 고조파 등의 발생으로 경제적 피해가 매우 크기 때문이다. IEEE에서는 전기 품질을 ‘설비의 적절한 운전 상태에서 민감한 설비에 전력공급 및 접지를 하는 개념’이라고 정의하고 있다. 이는 전기품질이 수용가의 기기를 손상시키지 않고 정상적으로 작동할 수 있도록 양질의 전원을 공급하여야 함을 의미한다고 할 수 있다.

전기품질의 관련 주 요소로는 순간정전(momentary interruption), 순시전압강하(instantaneous sag), 순시전압상승(instantaneous swell) 및 고조파(harmonics) 등이 있으며, 순간정전 및 순시전압강하가 전체의 80[%] 이상을 차지하고 있다.

IEEE에서는 순시전압강하를 ‘전력계통에서 부하에 공급되는 전압 실효값의 변동과 변동이 지속되는 시간에 대한 표준’을 규정하고 있다. 그 표준에는 순간전압강하가 외부의 원인으로 ‘배전계통 특정지점에서 전압의 실효값이 공칭전압 실효값의 10~90[%] 범위로 감소하며, 그 지속시간이 8.3 [ms]~0.5[s]인 경우’로 정의하고 있으며, 광의적인 분류로는 ‘0.5[s]~수분’ 까지도 순간전압강하로 정의하기도 한다.

그림 1은 전압강하에 대한 파형이다.[1,2] 전력 품질을 보상하기 위한 방법으로는 배전계통에 보상장치를 직렬로 연결하여 보상하는 직렬보상장치와 순간정전 및 순시전압강하

문제를 해결하기 위한 방법으로는 동적전압보상장치(DVR : Dynamic Voltage Restorer)방식이 많이 이용되고 있다.[3]

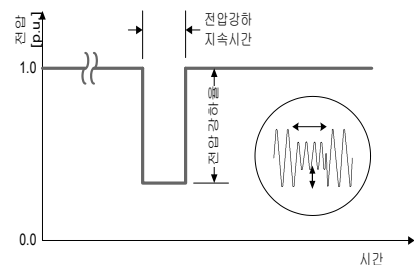


그림 1 순시전압강하에 대한 전압파형 정의
Fig. 1 Definite of Voltage wave instantaneous sag

순시전압강하를 보상하는 DVR에는 정전압변압기(CVT : Constant Voltage Transformer)를 사용하는 방법과 사이리스터와 승압용 변압기 탭을 제어(SVR : Static Voltage Regulator)하는 방법이 있으나 이 두 방식 모두 가변부하에는 응답특성에 문제가 있는 단점이 있다. 이러한 상황에서 전력저장시스템의 많은 문제점을 해결할 수 있는 새로운 축전자인 전기이중층캐패시터(EDLC : Electric Double Layer Capacitor 또는 Super Capacitor)가 출시되면서 전기응용분야의 많은 관심을 갖게 되었다.[4-6]

본 논문에서는 직렬전압보상방식 DVR시스템의 부족전압 보상에 사용되는 전해콘덴서 대신 성능을 개선시킨 EDLC를 이용한 DVR에 관한 연구를 하였다. EDLC를 이용한 DVR시스템은 표 1과 같이 환경, 수명, 동작 온도 등에서 기존에 사용한 전해콘덴서나 납축전지에 비해 많은 장점이 있다.[7,9]

[†] 교신저자, 시니어회원 : 동서울대학 전기정보제어과 교수 공박
E-mail : sclee@dsc.ac.kr

* 정 회 원 : 과인솔라 대표 공박
접수일자 : 2010년 4월 12일
최종완료 : 2010년 7월 24일

표 1 각 에너지 저장장치의 성능 비교

Table 1 Performance compare of each energy storage facilities

비교	전해콘덴서	EDLC	납축전지
주요특성	폭발 위험	친환경/반영구적	환경
DVR 구성요건	에너지밀도가 낮아 보상시간 문제	적당	충방전 속도에 문제
가격	비교적 저렴	Life Cycle 대비 비싸지 않음	비교적 저렴
작동온도	-25(°C)~65(°C)	-40(°C)~90(°C)	-20(°C)~70(°C)
수명	2~10년	20년(이상)	3~5년

2. 본 론

2.1 EDLC의 축전원리

그림 2는 EDLC 원리도로 활성탄을 분극성 전극에 응용한 구조이다. EDLC는 표면적이 매우 큰 다공질 도체의 집전극 사이에 전해액을 넣는 구조이다. 집전극인 도체를 전해액에 삽입하면 도체와 접하는 경계면에는 도체에 눌러진 분자에 의해 내층이 생기고 그 바깥쪽(전해액 측)에는 충전 전하에 의해 확산운동을 하고 있는 외층이 생긴다.

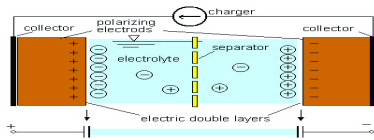


그림 2 EDLC의 원리
Fig. 2 Principle of EDLC

이러한 EDLC는 외부의 전압이 전해액에서 전기분해로 발생하는 전압보다 낮은 범위에서는 전류가 흐르지 않아 거의 절연상태가 된다. 이때 이를 절연막으로 하면 +, -극을 가지는 콘덴서 2개가 직렬로 연결되어 있는 구조로 되며, 이들 사이에는 전해액이 아주 미약하게 덮여져 있는 상태를 얻는다.

2.2 순시전압강하의 모형과 동적전압보상

순시전압변동은 전기적 외란에 민감한 각종 전력전자소자를 이용한 전자장비의 사용 증가로 인해 피해가 확산되는 원인이 되기도 한다. 이러한 변동은 배전시스템에서 개폐로 시 발생하는 선로의 순간정전과 인근선로의 순시전압강하 등과 같은 전압크기의 변동을 유발한다.[11]

그림 3은 이러한 배전계통에서의 회로를 간단히 모형화한 것이다. 그림 3에서 V_S 를 부하측에서 본 계통전압, Z_{line} 를 전송선로의 임피던스, Z_{load} 를 부하임피던스, Z_D 를 계통에서 부하 인근에 존재하는 합성임피던스로 정의한다.

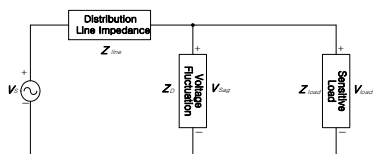


그림 3 순시전압강하 모형 회로
Fig. 3 Model circuit of instantaneous sag

정상적인 상태에서는 Z_D 와 Z_{load} 가 균형을 이루며 전압분배 법칙에 의하여 Z_{load} 의 양단전압 V_{load} 가 공칭전압을 유지하게 된다.

사고가 발생하면 부하 인근의 Z_D 가 짧은 시간 동안 급격하게 변화하므로 전압분배 법칙에 의해 V_{load} 가 변화하게 된다. 즉, 순간전압강하 등으로 Z_D 가 정상상태에 비해 작아지는 경우로 $Z_D \ll Z_{load}$ 의 관계가 성립되어 많은 전류가 Z_D 를 통하여 흐르게 되어 부하에 공급되는 전력이 감소하게 된다.

$Z_D \ll Z_{load}$ 인 상태에서는 Z_D 와 Z_{load} 의 합성임피던스가 정상상태에 비하여 현저히 작아지므로 전압분배법칙에 의하여 부하에 인가되는 전압이 낮아지게 된다.

그림 4는 DVR를 사용한 모형회로로 순시전압강하가 발생하였을 때 부하와 계통전원 사이에 직렬로 보상전압 V_{comp} 을 인가하는 개념도이다. 그림 3의 경우에 순간전압강하가 발생하면 $V_{load} = V_{Sag}$ 로 부하에 인가되는 전압을 공칭전압으로 유지할 방법이 없으므로 그림 4와 같이 보상전압이 존재하는 경우에는 순간전압이 발생하였을 때의 부하전압은 $V_{load} = V_{Sag} + V_{comp}$ 로 보상전압 V_{comp} 을 적절히 제어할 수 있으면 부하전압은 공칭전압으로 유지할 수 있다.

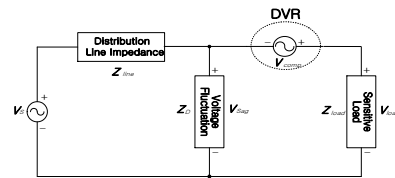


그림 4 동적전압보상 모형 회로
Fig. 4 Model circuit of Dynamic Voltage Restorer

즉 DVR은 그림 5와 같이 부하에 대해 직렬전압원으로 동작하게 되며 부하전압을 항상 일정하게 유지하기 위해 전원전압의 부족분을 보상해 주는 장치이다. 이때, 부하전압 V_{load} 은 전원전압 V_S 과 인버터에 의한 보상전압 V_{comp} 의 합으로 전압방정식은 $V_{load} = V_S + V_{comp}$ 이 된다.

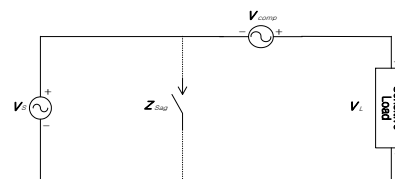


그림 5 DVR시스템 단상 등가회로
Fig. 5 Single phase equivalent circuit of DVR system

2.3 DVR시스템의 기본구성

그림 6은 전력계통에서 자연적 또는 인위적 재해요소에 의해 발생하는 순시전압강하를 보상하기 위하여 적용되는 DVR의 예이다. 그림 6에서 DVR은 지락사고 또는 개폐 시 발생하는 전원의 순시전압강하로부터 부하를 보상하기 위해 배전계통과 직렬로 연결되어 사용된다. 이러한 보상장치를 직렬전압보상장치(SVC : Series Voltage Compensator)라 한다. 따라서 그림 6과 같이 DVR은 민감한 부하에 직렬 전압원으로 동작하여 부하전압을 항상 일정하게 유지하도록 전원전압의 부족분을 보상해 주는 장치이다.

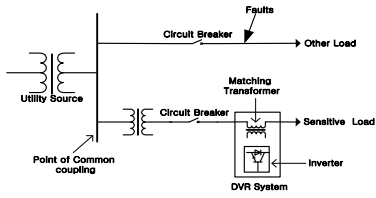


그림 6 배전계통에서 DVR시스템 설치
Fig. 6 DVR system in power distribution system

2.3.1 DVR의 동작과 제어모델

그림 7은 보상시스템의 회로로 보상전압을 발생시켜 매칭 변압기를 통해 계통과 연계하는 시스템이다. 여기서, R_f 는 내부저항, L_f 는 인덕턴스 및 C_f 는 커패시턴스로 LC필터의 파라미터이다. 부하를 R-L-C 직렬부하로 가정하면 등가회로의 상태방정식은 식(1)과 같다.

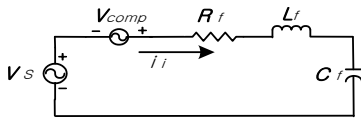


그림 7 DVR시스템 등가회로
Fig. 7 Equivalent circuit of DVR system

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{load} \\ v_{load} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_f}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{load} \\ v_{load} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_f} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s \\ i_{load} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \end{bmatrix} \cdot v_{comp} \quad (1)$$

DVR시스템은 부하에 공급되는 전압을 제어하는 것이므로 부하전압의 feedback이 필요하고 동특성을 향상시키기 위해서 인덕터 혹은 커패시터 전류의 feedback을 이용하여 제어기를 이중 feedback loop로 구성한다.

2.3.2 off-line형 DVR시스템

UPS의 전압보상방식은 부하의 전체용량을 보상하는 전전압 보상방식이기 때문에 용량이 커질 수 있고 24시간 가동되는 on-line 방식으로 인해 효율이 저하되는 단점이 있다. 이에 비해 DVR방식은 정상시에는 대기상태에 있다가, 약 1-3초 이내에서 순시전압강하 및 순간정전이 발생하는 순간에만 부족전압분을 직렬로 보상하는 off-line 방식이다.

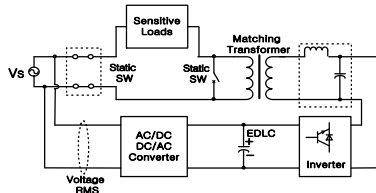


그림 8 off-line 방식의 전력회로 구성도
Fig. 8 Power circuit of the off-line method

그림 8은 off-line 방식의 전력회로 구성도이다. 그림 7에서 인버터 시스템은 계통 사고시 부하에 대해 양질의 전원을 공급 할 수 있는 직렬 전압원으로 동작한다. 매칭변압기

는 정상시에는 계통과 직렬로 연결된 인덕턴스로 동작되며 이 값은 대부분 계통의 선로 인덕턴스보다 매우 작으며 보상시 인버터와 계통을 연계시켜주는 역할을 한다. 절환 스위치는 DVR이 off-line으로 설치되는 보상장치일 경우 계통과의 절연을 위해 사용한다.

2.3.3 on-line형 DVR시스템

본 연구에서는 앞 절에서 설명한 양방향의 DC/DC 컨버터 구조를 가지는 off-line 타입 DVR 뿐 만 아니라 신뢰성이 우수한 on-line type DVR을 동시에 개발하였다.

그림 9는 on-line type DVR의 구조로 전원 소스로부터 민감 부하에 이르기까지 상시 가동시스템으로 DVR인버터가 운전하게 된다. 처음 전원 투입 시에는 소프트 스타터 저항으로부터 충전 돌입전류를 억제하고 있다가 어느 정도 EDLC가 충전된 이후에는 양방향성 다이리스터로 구성된 SSR(Solid State Relay)의 접점이 turn-on 되면서 주전원을 충전하게 된다. 이후 민감 부하는 전원의 순시정전 및 순시전압강하에 관계없이 민감 부하에 안정적인 전원을 공급하게 된다. 이후의 LC필터 등 DVR인버터의 추가적 구조들은 off-line 타입 DVR인버터와 구성이 같게 된다. 표 2는 off-line형 및 on-line형 DVR의 특징에 대한 비교이다.

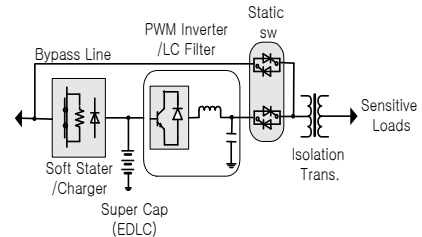


그림 9 on-line형 DVR의 구조
Fig. 9 Circuit of the on-line type DVR

표 2 off-line형 및 on-line형 DVR의 특징비교
Table 2 Compare with on-line and off-line type

종류	장점	단점
off-line형 DVR	<ul style="list-style-type: none"> 운전 효율이 좋음 넓은 부하범위 	<ul style="list-style-type: none"> 절환스위치가 항상 필요하며 이의 신뢰성 확보가 매우 어려움 순시전압강하를 검출하기 어려움 메인 전압의 위상 동기화가 어려움 상시가동 또는 대기운전 상태 DC/DC 컨버터의 구현이 어려움 제어가 매우 복잡
on-line형 DVR	<ul style="list-style-type: none"> 운전 신뢰성이 매우 좋음 저가형 구현 가능 제어가 간단 	<ul style="list-style-type: none"> 상시운전으로 효율저하 좁은 부하범위

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전압의 계속 검출

본 시스템에서 구현하고자 하는 DVR은 보상 동작이 실시간으로 이루어져야 하므로 이상전압에 대한 검출은 매우

중요한 부분이다. 본 논문에서의 전압검출 알고리즘은 순시치 이동평균기법을 적용하여 순시전압강하를 검출하였다.

그림 10, 그림 11은 전원측에서 발생한 순시전압강하로 가변전원을 이용하여 전압하강 및 전압상승에 따른 계측한 파형으로 RMS 값은 입력전압의 가변에 따라 잘 추종하고 있음을 보여준다.

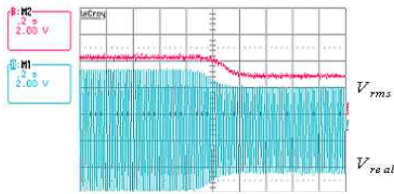


그림 10 입력전압 가변에 따른 RMS파형(전압하강)
Fig. 10 RMS wave form to the input voltage variable(Buck)

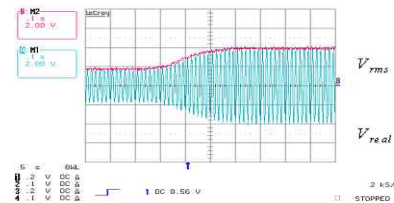


그림 11 입력전압 가변에 따른 RMS파형(전압상승)
Fig. 11 RMS wave form to the input voltage variable(Boost)

3.2 off-line형 DVR의 성능 검증

그림 12는 off-line 타입의 단상 DVR시스템에서 순시전압강하에 의한 DVR의 동작 파형이다. 그림 12에서 (a)의 AC입력이 순시전압강하가 발생한 동안 (b)는 입력전압의 RMS 파형, (c)는 DVR동작 후 민감 부하에서의 전압이 보상된 파형, (d)는 DVR 인버터가 동작된 후의 필터링 된 보상전류이다.

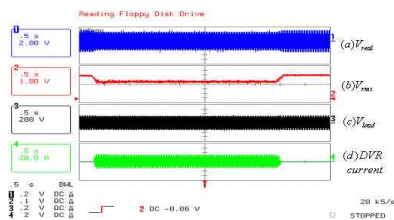


그림 12 순시전압강하시 DVR의 동작 파형
Fig. 12 DVR wave form at the instantaneous voltage buck

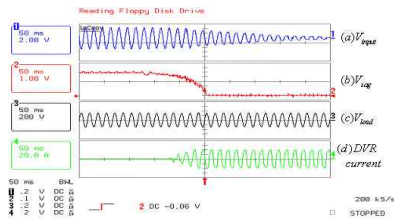


그림 13 순간정전시의 DVR 동작 파형
Fig. 13 DVR wave form at momentary interruption

그림 13은 전압을 가변하면서 순간 정전 시까지의 DVR 동작 파형이다. 그림 13에서 (a), (b)는 단상 인버터의 IGBT 게이트 시그널, (c)는 DVR동작 후 민감 부하에서의 전압, (d)는 DVR 인버터가 동작된 후의 보상전류이다.

3.3 on-line형 DVR의 성능 검증

그림 14는 SSR의 보호동작과 연계된 EDLC충전과 인버터 부하전류파형이다. 이는 그림 13에서 (a)와 같이 입력전압이 on/off를 반복하여도 (b)의 SSR 충전전류는 (c)의 EDLC충전전압의 상태에 따라서 가동되며 EDLC의 전압상태에 따라 (d)의 인버터는 on/off 운전을 판단하여 DVR이 운전된다.

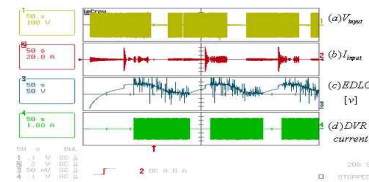


그림 14 SSR의 보호동작과 연계된 EDLC 충전과 인버터 부하전류 파형
Fig. 14 EDLC charge and Inverter load current wave form with the SSR protection

그림 15는 입력전압 차단으로 인한 EDLC 전압과 연계보상전압이다. (a)와 같이 입력전압이 차단되어 (b)와 같이 EDLC 전압이 떨어지더라도 가중치 PWM의 알고리즘에 의하여 (c)와 같이 DVR인버터의 보상전압은 일정하게 출력되고 있으며 이에 따라 (d)의 부하전류도 일정하게 유지되고 있다.

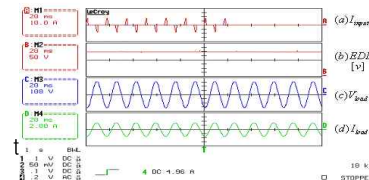


그림 15 입력전압 차단시 EDLC 전압과 연계보상전압
Fig. 15 EDLC and connection compensation voltage at the input voltage interrupt

3.4 시스템의 외형

본 논문에서는 off-line형 DVR 인버터의 실험장치를 개발 완료하였고 또한 고신뢰성이 확보된 on-line형 DVR 인버터를 개발하여 시제작 실험을 완료하였으며, 실험회로의 외형은 그림 16, 그림 17과 같다.

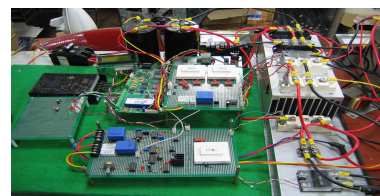


그림 16 off-line type DVR 인버터
Fig. 16 Off-line type DVR inverter

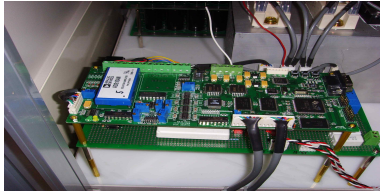


그림 17 on-line type DVR의 CPU보드
Fig. 17 CPU board of the on-line type DVR

4. 결 론

본 논문에서는 최근에 친환경 신소재로 주목받고 있는 슈퍼커패시터 개념의 EDLC를 이용하여 운전의 신뢰성을 on-line 및 off-line 타입의 DVR 시스템에 관해 고찰하였다. 이에 대한 시스템의 개발에 따라 다음의 검증결과로 요약하였다.

- (1) off-line형 DVR인버터의 DC/DC컨버터에 의한 EDLC의 전압 증·방전 변동에 따른 새로운 전압 RMS 및 위상 각 검출 기법을 개발하여 오차 최소화 및 신뢰성을 제고하였다.
- (2) on-line형 DVR 및 off-line형 DVR을 동시에 개발하여 수요자로 하여금 선택도를 높이도록 하였고, 시스템의 간소화에 따라 이 장치의 실용/보급화의 기틀을 마련할 수 있게 하였다.

따라서, 본 논문의 연구 결과는 새롭게 전개되고 있는 EDLC의 적용에 대한 다양한 요구기술의 해결에 의하여 그 실용성이 촉진되리라 판단되며, 특히 EDLC를 적용한 DVR에 대한 다양한 토폴로지 구성과 EDLC적용의 고효율·고성능 제어기법 등은 향후 전기품질 개선기기에 대한 보급화에 기여되리라 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] IEEE P1409 Draft 3, "Trial Use Guide for Application of Power Electronics for Power Quality Improvement on Distribution Systems Rated 1kV through 38kV," Working Group on Distribution Voltage Quality, Feb, 2000.
- [2] IEEE Std. 1346-1998, "IEEE Recommended Practice for Evaluating Electric Power System Compatibility with Electronic Process Equipment."
- [3] SEMI Draft Doc. 2844A-rev. 10/15/98. "Provisional Specification for Semiconductor Processing Equipment Voltage Sag Immunity."
- [4] 일본전기학회, "파워일렉트로닉스 핸드북; 4.5 전기이중층 캐패시터와 그 시스템," 2001년 파워일렉트로닉스 핸드북, pp. 667-704, 2001.
- [5] ANSI/IEEE Std. 446-1987, "IEEE Recommended Practice for Emergency Standby Power, Systems for Industrial and Commercial Applications," IEEE Orange Book, pp. 75.
- [6] W. E. Kazibwe, et al, "Power quality : A Review," IEEE Trans. on Computer Applications in Power,

vol. 3, no. 1, pp. 39-42, January, 1990.

- [7] 손진근, "수퍼커패시터를 이용한 상시가동형 순시전압강하 보상시스템의 개발," 전기학회논문지 P권, vol. 58, no. 2, pp. 101-107, 2009.
- [8] 전희중 외, "친환경 Ultra-capacitor에 의한 순시전압강하의 직렬전압보상 시스템," 전기학회논문지, vol. 58, no. 4, pp. 763-769, 2009.
- [9] 손진근 외, "Super-Capacitor의 고장진단을 위한 파라미터의 특성 해석," 대한전기학회 2008년 전문대학위원회 학술대회논문집, pp. 74-76, 2008. 11.
- [10] 박종찬 외, "EDLC의 Energy이용 향상에 의한 On-Line type Dynamic Voltage Restorer System," 대한전기학회 2007년 하계학술대회논문집, pp. 1099-1101, 2007. 7.
- [11] 지준근 외, "AC 라인 리액터와 병렬 및 직렬 능동필터를 가지는 새로운 3상 Line-Interactive UPS 시스템의 전압제어 방식," 전기학회논문지, vol. 56, no. 3, pp. 538-546, 2007.

저 자 소 개



이 상 철 (李 相 喆)

1952년 8월 13일생. 1977년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 1981/1991년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 1981년-현재 동서울대학 전기정보제어과 교수. 2008년-현재 대한전기학회 산업전기위원회 회장

Tel : 031-720-2065

E-mail : sclee@dsc.ac.kr



서 일 등 (徐 一 東)

1959년 10월 7일생. 2003년 서울산업대학교 전기공학과 졸업. 2005/2009년 숭실대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사/박사). 현재 파인솔라 대표

Tel : 011-335-4605

E-mail : doe15016@hanmail.net