

## EDLC의 Energy이용 향상에 의한 On-Line type Dynamic Voltage Restorer System

손진근\* 박종찬\*\* 서일동\*\*\* 전희중\*\*\*  
 경원대학교\*, 오산대학\*\*, 송실대학교\*\*\*

### On-Line Type Dynamic Voltage Restorer System by Improvement of EDLC's energy utilization ratio

Jin-Geun Shon\*, Jong-Chan Park\*\*, Il-Dong Seo\*\*\*, Hee-Jong Jeon\*\*\*  
 Kyung-Won University\*, Osan College\*\*, Soong-Sil University\*\*\*

**Abstract** - In this paper, a study has been performed for development of dynamic voltage restorer(DVR) system using EDLC (Electric Double Layer Capacitor) to solve voltage sags which are considered the dominant disturbances affecting power quality. With the prolific use of semiconductor devices in electrical equipment, modern-day loads are becoming increasingly sensitive to the sags and the disturbances prove to be costly to industries. As a technology-driven custom power installation, the Dynamic Voltage Restorer (DVR) is recognized to be most effective equipment that can be used to counter the voltage sag problem.

Hence, this paper proposes the high-performance optimal design of On-Line type DVR system which can efficiently compensate the instantaneous voltage sag and instantaneous interruption of the utility voltage source.

#### 1. 서 론

최근, 전기적 외란에 민감한 정밀 부하설비의 사용이 매우 증가하면서 전기품질(Power quality)의 문제에 관심이 고조되고 있으며, 특히 전압의 크기변동 문제는 경제적 피해가 매우 크기 때문에 지속적인 관리가 요구되고 있다. 이러한 문제 중에서 배전계통의 순시적 전압강하는 계통의 지락사고, 낙뢰, 대형 전동기의 기동, 낙뢰발생 등의 원인으로 발생하며, 순시적 전압강하의 지속시간은 8[ms]~3[s]에 해당하는 경우로 정의한다<sup>[1]</sup>. 이러한 순시적 전압강하의 보상장치는 부하의 보상범위 및 경제적 측면에서 UPS보다 유리한 직렬 전압의 주입 보상장치가 효과적인 것으로 알려져 있으며, 이에 대한 명칭은 VSC(voltage sag compensator)등 다양한 명칭이 사용되지만 최근에는 ABB에서 개발한 DVR(dynamic voltage estore)의 명칭이 통용되고 있는 실정이다<sup>[2]</sup>.

이러한 DVR시스템은 부하에 공급되는 전압 중에서 순간적으로 전압강하가 발생한 크기만큼을 부하에 추가로 공급해주는 직렬 전압주입장치이며, 주로 Off-Line 타입이 사용되고 있다. 이의 방식은 전압을 순시적으로 계측하여 전압 새그 이벤트시에 전압을 주입하게 되는데 이는 전원과 주입전압의 사이를 관리하는 두 개의 양방향성 스위칭소자의 투입에 대한 신뢰성 문제 및 정확한 계측등의 문제점 때문에 최근에는 On-Line 방식의 DVR이 사용되기도 한다. 이의 방식은 DVR 인버터에 의하여 UPS와 같이 상시 가동시스템으로 운전되는 것으로 전원 및 고정밀 부하운전의 신뢰성을 우선적으로 고려하는 방식이다.

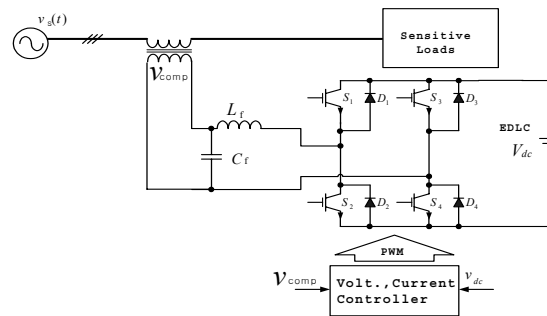
따라서 본 논문은 신뢰성이 우수한 On-Line타입의 DVR을 개발한 연구내용을 기술한 것으로, 에너지의 축적은 기존에 사용되던 전해커패시터보다 축전용량, 수명 및 안전성, 환경적 측면 등에서 우수한 전기이중층 커패시터(electric double layer capacitor:EDLC)를 사용하고, 고효율 PWM 방식 및 소프트 스타터 등 다양한 보호 알고리즘을 실험, 개발한 결과를 제시하고자 한다.

#### 2. EDLC에 의한 DVR의 구성

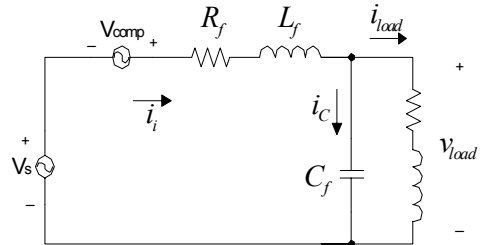
##### 2.1 Off-Line Type DVR의 구성

순시적인 전압강하의 동적전압보상장치인 DVR시스템은 전원의 순시전압강하로부터 민감한 부하를 보상하기 위하여 사용된다. 따라서 DVR은 그림 1과 같이 시스템 회로가 구성되어 보상 전압( $V_{comp}$ )을 발생시켜 정합 변압기를 통하여 계통과 연계되는 시스템이다. 그림 2는 위의 DVR시스템에 대한 전기적 등가회로를 나타낸 것으로  $R_f$ ,  $L_f$ ,  $C_f$ 는 각각 LC필터의 내부저항 및 인덕턴스, 커패시턴스 파라미터를 나타내며, 민감 부하는 R-L 직렬부하로 가정할 수 있다.

그러나 이러한 DVR방식은 전압 새그발생시 부하에 공급되는 전압 중에서 순간적으로 전압강하가 발생한 크기만큼을 부하에 추가로 공급해주는 직렬 전압주입장치이기 때문에 전원전압의 정확한 계측 및 주입전압의 크기 및 위상제어가 필요하며, 전원과 주입전압의 사이를 관리하는 두 개의 양방향성 스위칭소자의 구동문제 및 신뢰성의 문제점 때문에 최근에는 상시가동되는 On-Line 방식의 DVR이 사용되기도 한다.



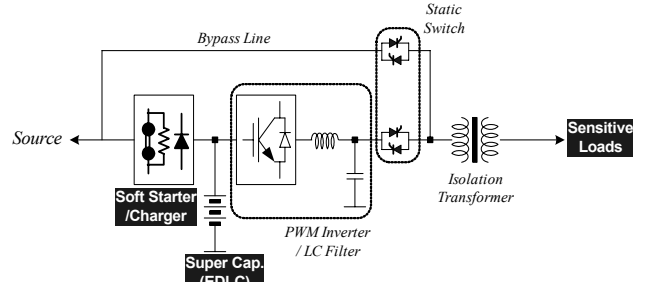
〈그림 1〉 Off-Line DVR시스템의 회로구성



〈그림 2〉 Off-Line DVR시스템의 등가회로

##### 2.2 On-Line Type DVR의 구성

이의 방식은 DVR 인버터에 의하여 UPS와 같이 상시 가동시스템으로 운전되는 것으로 전원 및 고정밀 부하운전의 신뢰성을 우선적으로 고려하는 방식이다. 이러한 On-Line방식의 시스템 구성시에는 에너지 축전요소의 선택, 이의 고효율 충방전 제어 및 에너지 이용을 향상, 초기 충전시의 소프트스타터의 제어가 필요하고, 인버터의 고효율 운전을 위한 PWM방식의 기술, 시스템 절연 및 전압 배정을 위한 정합변압기의 제어가 중요한 기술적 요소이며 이의 구성은 그림 3과 같다.



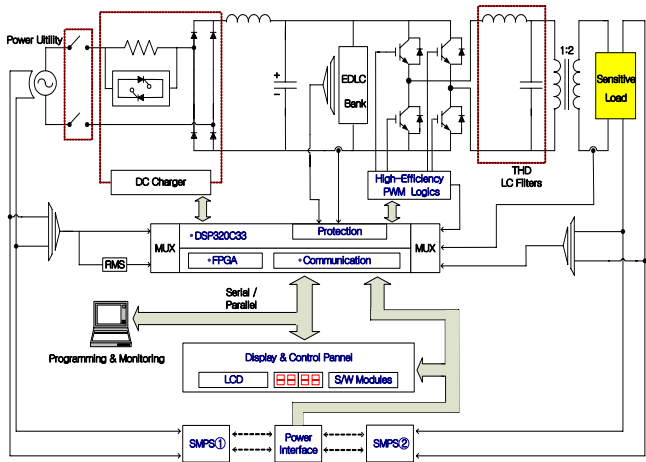
〈그림 3〉 On-Line 방식의 DVR시스템의 구성

그림 3에서 나타난 에너지 축전요소는 전기이중커패시터(EDLC)를 사용한다. 이는 표면적이 매우 큰 다공질 도체의 전극 두 개를 서로 직접 닿지 않도록 절연막을 형성하도록 하고 그 사이에 미소의 전해액을 집어넣는 구조를 가진 커패시터이다. 이러한 구조는 절연막의 극한적인 두께(d)와 다공질에 의한 거대한 표면적(S)에 대한 전극형성은 이론적 수식 ( $C = \epsilon S / d$ )과 같이 대 정전용량의 커패시터 제작이 가능하게 된다.

전해커패시터를 사용한 기존의 DVR은 충·방전 응답속도가 매우 빨라서 DVR 응용에는 적합하지만 에너지 저장능력이 매우 낮아 전압 보상시간이 아주 짧고, 고온에서 수명이 짧으며, 수명말기에는 전해액 증기가 분출하여 폭발의 위험성이 있는 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 또한 납축전지를 사용한 경우에는 충·방전 속도가 매우 느리고, 대전류 급속 충·방전이 불가능하고, 수명이 매우 짧으며, 주기적인 유지보수가 필요하기 때문에 경제적 부담이 만만치 않게 된다. 특히 환경적인 차원에서 매우 심각한 문제를 유발시킬 수 있기 때문에 최근에는 이를 보완할 수 있는 새로운 축전시스템의 도입이 절실하게 요구되고 있으며 이에 적당한 축전요소가 바로 EDLC이다.

### 2.3 개발시스템의 회로구성

그림 4는 상시 가동 시스템으로 DVR 인버터가 운전되는 On-line Type DVR의 개발시스템에 대한 전체구성도를 나타낸 것이다. 초기에 투입되는 전원은 소프트 스타터 저항으로부터 충전 돌입 전류를 억제하고 EDLC가 충전된 이후에는 양방향성 Thyristor로 구성된 SSR(Solid State Relay)의 접점이 턴온되면서 메인전원을 충전하게 되며 이때부터 DVR 인버터가 가동된다. 이때의 전원은 SMPS①에 의하여 제어 전원을 공급받게 되며, 고속연산 CPU인 TMS320C33 보드에 의하여, 통신 및 FPGA, RMS 연산 등이 수행된다.



〈그림 4〉 On-line Type DVR의 전체 구성도

이후 민감 부하는 전원의 순시정전 및 순시적 전압강하에 관계없이 민감 부하에 안정적인 전원을 공급하게 된다. 이후 순시정전 및 순시적 전압강하 발생 시에는 SMPS②에 의하여 제어전원을 공급 받게되며 EDLC의 설정 에너지용량에 비례하여 DVR 인버터의 보상시간이 결정되게 된다. 이때의 DVR 인버터는 고효율 PWM 제어기법으로 운전하게 되며, EDLC의 방전상태와 연동하여 PWM이 수행된다. DVR 인버터의 출력전압은 THD를 감소시킬 수 있는 LC필터와 매칭변압기를 거친 후 민감 부하에 메인전원이 공급되게 하였으며, 각종 보호시스템 및 계측, 모니터링 기능을 수행하면서 DVR 인버터가 운전된다.

### 2.4 개발시스템의 에너지이용 향상 및 고효율 운전

본 개발에서 적용하는 EDLC는 전해커패시터와 납축전지의 장점들은 그대로 유지하면서 에너지 축전용량, 수명 및 안전성 등 단점을 보완한 에너지 저장장치로 EDLC의 저장 제어장치, 효과적인 에너지 사용을 위한 EDLC 적·병렬절체 회로, 시스템 보호기능의 도입이 필요하다. 특히 EDLC의 고효율 제어를 위해서는 정전류제어의 충전장치가 효과적이며, 전압 방전시에는 PWM의 탄력적 대응(DC링크 전압과 연계된 가중치 PWM)이 필요하다.

또한 본 시스템과 같은 인버터 전압제어는 PWM방식을 적용하여 사용한다. 이 방식은 공간전압벡터 PWM등 다양한 기법이 있으나 단상과 같은 간단한 시스템의 경우에는 기존 전압과 전원전압과의 오차전압과 삼각파를 사용하는 정현파 PWM을 행하는데, 기존 방식으로는 오차전

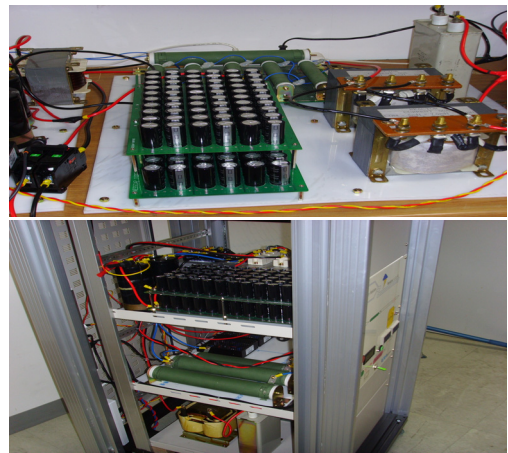
압(변조율)과 삼각파 신호를 한 개만 사용하여 전압을 제어하기 때문에 스위칭 주기 내에서 모든 스위치가 on/off 동작을 하여 열 손실을 초래하는 등 효율적이지 못한 단점이 있다. 따라서, 이러한 문제점을 극복하기 위하여 본 시스템에서는 고효율 PWM 방식인 더블캐리어 변조방식을 적용하고자 한다.

이러한 기법의 구현은 그림 1과 같이 4개의 IGBT 스위칭 소자에 의하여 동작하게 되는데, 이는 인버터의 출력전압이 positive일 때는 S<sub>3</sub>는 off, S<sub>4</sub>는 on이고, S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub>는 변조파와 삼각파와의 비교결과에 의하여 PWM을 수행한다. 또한 인버터의 출력전압이 negative일 때는 S<sub>1</sub>이 off 되고, S<sub>2</sub>는 on되며, S<sub>3</sub>와 S<sub>4</sub>는 변조파와 삼각파와의 비교 결과에 의해 on/off된다. 이와 같은 개념은 삼각파 C1보다 변조파가 더 큰 경우에는 S1이 on되고, 삼각파 C2보다 변조파가 더 큰 경우에는 S1이 off되는 가정 하에서 스위칭이 행해진다. 이와같은 더블캐리어 변조방식을 이용한 회로의 구성은 IGBT 4개가 한 스위칭 주기 내에서 항상 스위칭을 하는 기존의 경우보다 효율을 높일 수 있다.

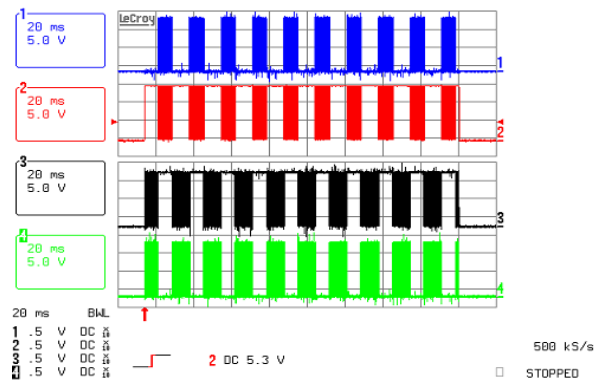
또한 On-line Type DVR에서는 EDLC의 충전과 관련한 초기 소프트 스타터의 동작과정에 대한 제어가 필요하다. EDLC의 충전전압을 서서히 충전시키기 위해서는 그림 4와 같이 SSR의 제어가 필요하며, 이의 구성 및 시퀀스의 연계동작에 대한 구성을 정밀하게 하여 전압의 보호동작이 될 수 있도록 하여야 한다.

### 3. 실험 및 결과 고찰

본 개발에서는 5[kVA]의 용량을 가지는 On-Line타입 DVR시스템을 제작 실험하였다. 그림 5는 앞서 설명한 EDLC의 외형 및 개발시스템의 외형을 나타낸 것이다. 국내의 N사에서 제작된 것으로 2.7[V], 100[F]의 단위셀 용량을 가지는 EDLC 72개가 직병렬로 조합되어 1층판 당 180[V], 1.54[F]의 용량 두 개가 직렬로 조합되어, 5[kVA]의 부하를 1초 동안 보상하도록 축전시스템이 구성 되었으며, 그 오른쪽 옆에 있는 리액터와 캐패시터는 인버터 출력단의 LC필터를 나타낸 것이다. 1층판 두 개로 고효율 운전의 더블캐리어와 변조방식에 의하여 PWM된 DVR인버터 게이트신호를 두 Arm의 +, -스위칭으로 각각 구별하여 나타낸 것이다. 그림 6에서는 인버터의 변조 신호(채널 2) 의한 두 암의 스위칭 신호(채널 3 4)와 이에 따른 인버터 출력전류 파형의 동기부분을 나타낸 것이다.

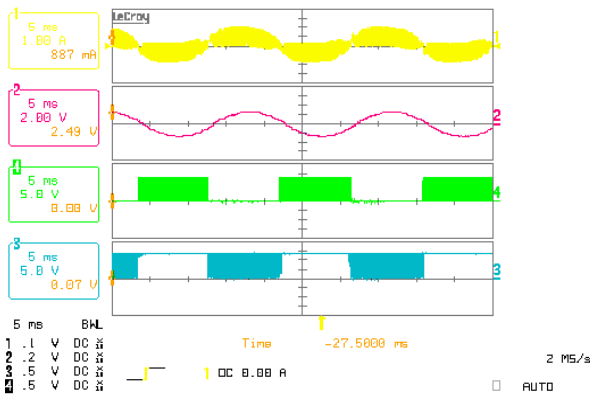


〈그림 5〉 EDLC(위) 및 개발시스템의 외형(아래)



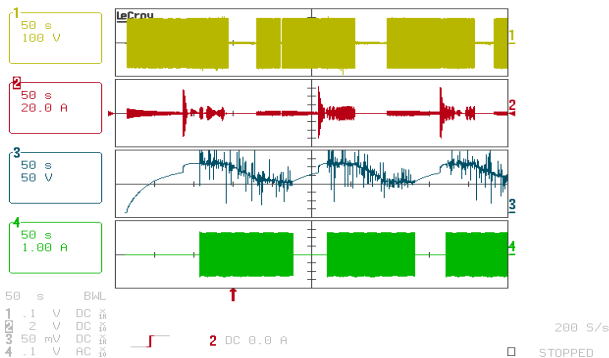
〈그림 6〉 DVR 인버터의 고효율 스위칭 신호

그림 6은 앞서 설명한 고효율 운전의 더블캐리어파 변조방식에 의하여 PWM된 DVR인버터 게이트신호를 두 Arm의 +, -스위치로 각각 구별하여 나타낸 것이다. 그림 7은 그림6과 같은 스위칭방식을 표현한 것으로, 인버터의 변조 신호(채널 2) 의한 두 암의 스위칭 신호(채널 3, 4)와 이에 따른 인버터 출력전류 파형의 동기부분을 나타낸 것이다.

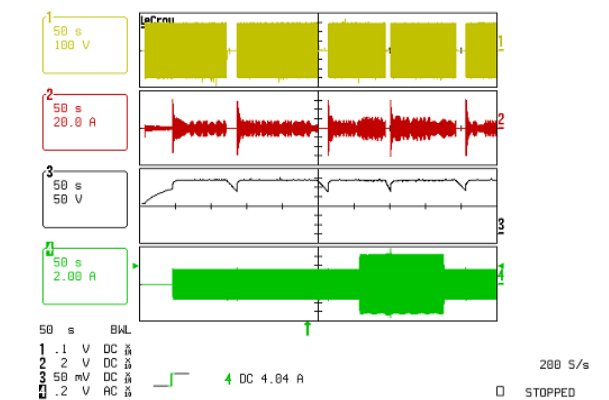


〈그림 7〉 PWM의 신호발생과 인버터 전류

그림 8은 SSR의 보호동작과 연계된 EDLC충전과 DVR인버터의 부하전류파형이다. 이는 채널 1과 같이 입력전압이 On/Off를 반복하여도 채널 2의 SSR 충전전류는 채널 3의 EDLC충전전압의 상태에 따라서 가동 및 제어되며, EDLC의 전압상태에 따라 채널 4의 인버터는 On/Off운전을 판단하여 DVR이 운전된다. 그림 9는 EDLC의 충·방전과 SSR의 보호동작과 검증을 부하전류 가변시에도 확인한 것이다.



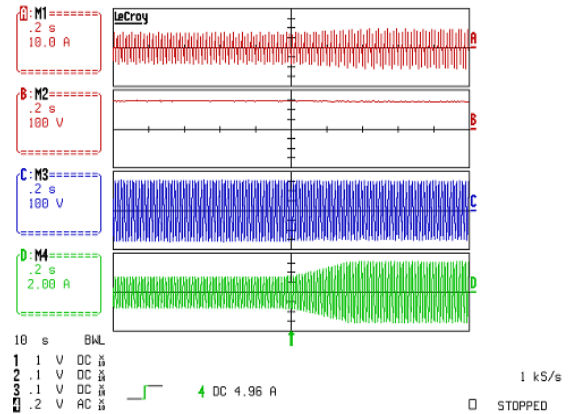
〈그림 8〉 SSR의 보호동작과 연계된 EDLC충전과 인버터의 부하전류



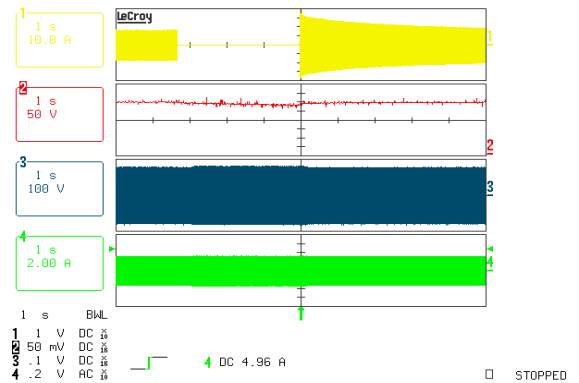
〈그림 9〉 EDLC의 충방전과 SSR의 보호동작과 검증(부하전류가변)

그림 10은 On-line Type DVR 인버터의 동작을 완성시킨 파형이다. 민감 부하를 가변시켰을 경우에 SSR 다이오드 입력전류와 DVR 인버터의 부하전류를 가변시킨 파형을 나타낸 것이다.(채널A : SSR 다이오드 입력전류, 채널B : EDLC 충전전압, 채널C : 인버터 출력전압, 채널D :

DVR인버터의 부하전류). 또한, 그림 11은 입력전압 차단으로 인한 EDLC 전압과 연계보상전압을 나타낸 것이다. 채널 1과 같이 입력전압(전류)이 차단되어 채널2와 같이 EDLC 전압이 떨어지더라도 가중치 PWM의 알고리즘에 의하여 채널 3과 같이 DVR 인버터의 보상전압은 일정하게 출력되고 있으며 이에 따라 채널 4의 부하전류도 일정하게 유지되고 있음을 보여주고 있다.



〈그림 10〉 On-line DVR 인버터의 동작(부하가변)



〈그림 11〉 On-line DVR 인버터의 동작(입력차단시 부하전류)

#### 4. 결론

전기품질의 문제 중에서 특히 전압의 크기변동에 대하여 경제적 피해 규모가 점점 커져가고 있다. 이러한 전압변동의 문제, 즉 순시적 전압강하 및 순간 정전을 해결하기 위한 효과적인 대안으로 직렬보상장치 또는 동적보상장치(DVR)에 대한 연구가 최근 매우 활발하게 진행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 주문형 전력기로 자리잡고 있는 On-Line타입의 DVR시스템을 개발하였다. 이때의 에너지 저장장치로는 납축전지와 전해커패시터의 장점을 모두 가진 EDLC를 적용하여 효율적인 제어를 수행하여 이의 에너지 이용률을 향상시켰고, 또한 고효율의 인버터시스템 및 소프트 스타터 등 각종 보호알고리즘 기능을 탑재하여 시스템을 제작·실험·검증하여 그 결과를 제시하였다.

#### [참고 문헌]

- [1] Math H. J. Pollen, Understanding Power Quality Problems, IEEE Press, 1999
- [2] W.E.Kazibwe et al, "Power quality : A Review", IEEE Computer Applications in Power, Vol.13, NO.1, pp39-42, January 1990
- [3] Florida Educational Seminars, Inc., "The 10th International Seminars on Double Layer Capacitors and Similar Energy Storage Devices", December 3-5,2001.
- [4] 손진근 외 3명, 'DVR시스템을 위한 EDLC의 고효율 제어기법', 2006년도 전력전자학술대회 논문집, 2006. 06. 22
- [5] 손진근 외 2명, '동적전압보상기를 위한 정합 변압기의 돌입전류 제어', 전력전자학회 논문지 제11권 제4호, pp21-27, 2006.08.20
- [6] 일본전기학회편집, "파워일렉트로닉스 핸드북; 4.5 전기이중커패시터와 그 시스템", 일본 2001년 파워일렉트로닉스 핸드북, pp.667-704, 2001.