

DVR 시스템을 위한 EDLC의 고효율 제어 기법

한종희* 전희종* 임병국** 손진근*** 박종찬§
 숭실대학교*, 충주대학교**, 경원전문대학***, 오산대학§

High Efficiency Control scheme of EDLC for DVR System

Jong-Hee Han*, Hee-Jong Jeon*, Byung-Kuk Lim**, Jin-Geun Shon***, Jong-Chan Park§
 Soong-Sil Univ.*, Chung-Ju Nat'l Univ.**, Kyung-Won College***, Osan College§

ABSTRACT

In this paper, we propose EDLC's high effective operating techniques. EDLC is energy storage device that has advantages of electrolytic capacitor and accumulation capacitor and that supplements defect such as energy storing accumulation capacity, life time and safety. But, EDLC needs for more complex control scheme because is influenced directly in efficiency and life time by charge and discharge control method. In this paper, DVR system's performance is proposed by EDLC's high effective operating technique.

1. 서 론

최근 전력 품질 문제가 소비자의 민감한 관심사항으로 급격히 떠오르고 있다. 전기적 왜곡에 민감한 정밀 설비의 사용이 폭발적으로 증가하였기 때문이다. 정전 및 순시 전압변동에 대한 대비책을 세우는 것이 가장 현실적인 방법으로 널리 사용되고 있다. 이런 대비책 중 UPS는 전원에서 발생하는 장애들에 대한 대비책이다. 그러나 UPS는 효율저하와 높은 비용 장치라는 문제를 갖고 있다.^{[1][3]}

최근, DVR은 UPS의 단점을 극복하기 위하여 많이 연구되고 있다. DVR은 전력공급이 정상적인 때는 stand-by 상태에 있다. 그리고, 1초 또는 3초 이내에서 순간 전압 강하 및 순간 정전이 발생할 때에만 오프라인 방식으로 전압을 보상한다. 이 때문에 운전효율은 높지만 순간적인 보상시간 때문에 급속 충·방전이 가능한 전기적(전해)커패시터뱅크를 부착해야 하는 문제 때문에, 배터리를 장착한 UPS 보다 보상시간이 지극적이지 못하다.^{[2][4]}

본 논문에서 DVR의 에너지 저장장치로 사용한 전기이중층콘덴서 EDLC는 에너지저장장치로써 사용되었던 납축전지와 전해커패시터의 장점요소를 결합한 신소재의 환경친화적 저장장치이다. 납축전지에 비해서는 수명 및 환경적 면에서 매우 유리하고 급속 충·방전 및 온도특성이 매우 우수하며, 전해커패시터에 비해서는 수십 만 배의 에너지밀도가 및 장수명으로 인하여 매우 주목받고 있는 장치로써, 최근에는 전기자동차 및 주문형 전력설비 분야에 응용하려는 시도가 증가되고 있다. 그러나 EDLC는 충·방전장치에 의하여 에너지의 효율과 수명에 직접적으로 영향을 받기 때문에 고효율 운전을 위해서는 정전류 충전, 정전압 방전의 제어를 수행해야한다. 따라서 본 논문에서는 EDLC의 고효율 운전을 위한 충·방전 제어기법을 제안하고 실험을 통해 타당성을 증명하였다.^[4]

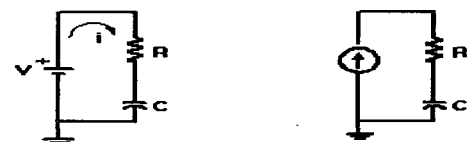
2. EDLC의 고효율 제어알고리즘

2.1 EDLC의 충·방전 제어회로

DVR에서 에너지 저장장치로 사용된 EDLC는 기존에 에너지 저장장치로 사용되었던 납축전지와 전해커패시터의 장점을 모두 갖춘 장치로 DVR 시스템의 효율을 높일 수 있다. 또한, 환경친화적 소재를 적용하기 때문에 선진국의 강력한 환경규제 지침의 대비책의 일환이 되며, 고성능 저가격화에 의한 보급화 실현의 목적을 가지고 있다. 따라서, EDLC의 효율을 향상시킴으로써 DVR의 성능을 향상시키고자 한다.

2.2.1 충전시 전류원 제어회로에 의한 효율 향상

그림 1(a)와 같이 완전히 방전된 커패시터를 발전기에 의해서 충전하는 경우, 즉 전압이 0이고 내부저항이 R인 대용량 EDLC에 발전기의 기전력 V를 인가하면 충전전류 I는 V/R만큼 흐를 수 있지만 발전기의 측면에서 보면 이는 부하가 단락된 상태이므로 보호회로가 없으면 발전기는 곧 소손된다. 또한 커패시터 단자전압 V는 충전에 의해 흘러들어온 전하 Q에 의해 $V=Q/C$ 의 비율로 상승하지만 정전용량 C가 작다면 부하가 단락된 상태와 비슷한 크기의 대전류가 흐르게 되는 것이므로 극히 짧은 시간 내에 충전이 끝나게 된다. 이러한 경우 전압원의 충전은 적당하지 않고 전류원 제어회로에 의한 충전이 필요하게 된다. 이와 같이 EDLC는 전압원에 의한 충전은 적당하지 않지만, 2차 전지인 납축전지는 그 자체가 전압원이기 때문에 전압원으로부터 충전하여도 별다른 문제는 생기지 않는다.



(a) 전압원 방전 (b) 전류원 충전
 그림 1 EDLC의 충·방전 회로
 Fig. 1 Equivalent Circuit for EDLC's charge and discharge

2.2.2 방전시 전압 제어회로에 의한 안정된 전압공급

그림 1(a)와 같은 전압원 회로에서 정전용량 C인 EDLC와 정전압원 V와의 사이에 연결된 저항 R을 통해 t초 후에 흐르는 전류 i는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

또한 저항 R에서 소비하는 전력은 식 (2)와 같이 구할 수 있는데, 이것은 커패시터에 축적될 수 있는 에너지를 나타낼

수 있는 식과 같게 되기 때문에 정전압원에서 충·방전을 수행할 경우 에너지 효율은 50[%]가 됨을 알 수 있다.

$$i = \frac{V}{R} \exp\left(-\frac{t}{CR}\right) \quad (1)$$

$$\int_0^{\infty} i^2 R dt = \frac{1}{2} CV^2 \quad (2)$$

그러나, 그림 1(b)에서처럼 전류원에 의한 충방전 효율은 다음과 같다. 즉, 정전류 I로 t시간 충전 또는 방전했을 경우에 전하를 Q로 하면 식(3)과 같다.

$$Q = I \cdot t \quad (3)$$

따라서, EDLC 커패시터에 저장한 전력량 A는 식 (4)와 같이 표현되고, 저항 R에서 소비되는 전력량 B는 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$A = \frac{1}{2} \cdot \frac{Q^2}{C} \quad (4)$$

$$B = I^2 R \cdot t = R \cdot \frac{Q^2}{t} \quad (5)$$

식 (4)와 식 (5)의 두 식을 이용하여 손실과 축전전력량의 비 k를 구하면 식 (6)과 같이 된다.

$$k = \frac{B}{A} = \frac{2RC}{t} \quad (6)$$

이 식에서 충·방전시간 t가 길수록 축전량에 대한 손실의 비율 k를 줄일 수 있으며 결과적으로 전류원 제어회로에 의하여 충·방전 효율을 제어할 수 있다.

또한, 식 (6)에 근거하여 정전류원에 의한 충전시의 효율 E_C 와 방전시의 효율 E_D 는 식 (7), 식 (8)과 같이 쓸 수 있다.

$$E_C = \frac{A}{(A+B)} = \frac{t}{(t+2RC)} \quad (7)$$

$$E_D = \frac{(A-B)}{A} = 1 - \frac{2RC}{t} \quad (8)$$

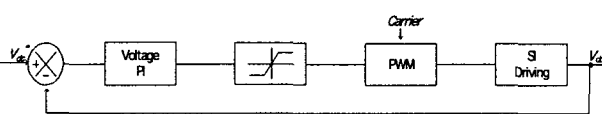
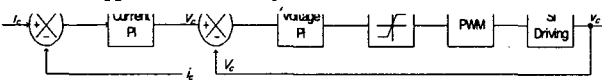


그림 2 EDLC의 충방전 제어 회로 블록도
Fig. 2 Charge-discharge control system of EDLC

그러므로 EDLC의 충·방전 제어회로는 그림 2와 같은 충전 및 방전의 절체가 가능한 제어기의 구성이 요구된다. 이때의 전류원 회로는 전형적인 PI제어기로 구성가능하며 전압원 회로는 DC/DC 컨버터의 시비율(duty ratio)제어로 얻을 수 있다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 3은 DVR의 전체 시스템 구성도이다. 전체 시스템에서 EDLC는 DVR 전체 시스템의 에너지 저장장치의 역할을 하며, 충·방전은 본 논문에서 제안한 정전류 충전 / 정전압 방전을

양방향 DC/DC 컨버터로 하게 된다. 위와 같은 구성을 통하여 DVR의 효율을 향상시키기 위해 EDLC의 충·방전 제어 기법의 시뮬레이션과 실험을 수행하였다.

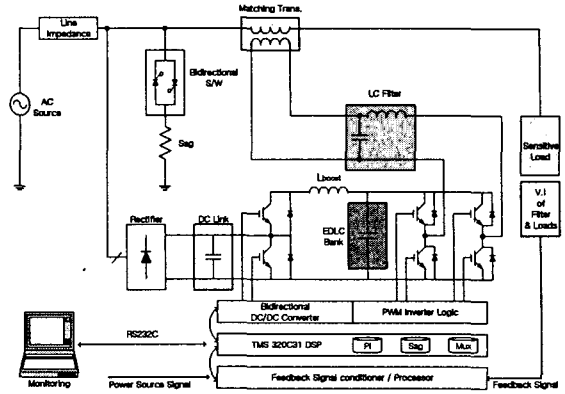


그림 3 DVR의 전체 시스템 구성도
Fig. 3 Overall Diagram of DVR Design System

EDLC의 충·방전 제어 동작과형은 정전류 제어를 위한 상보형 DC/DC컨버터의 주회로 및 제어회로의 동작으로 대별된다. 그림 4의 (a)는 DVR 인버터의 출력전압을 (b)에서는 EDLC 양단의 출력전압을 (c)는 EDLC의 입출력 전류를 나타낸 것이다. DVR을 동작시키기 전까지는 EDLC의 충전전류 및 전압이 일정하게 유지되고 있다가 50[ms]지점에서 순시전압강하가 발생하여 DVR이 동작한 후에는 EDLC전압을 일정하게 유지하기 위하여 전류제어기는 빠른 속도로 조절을 거치게 된다.

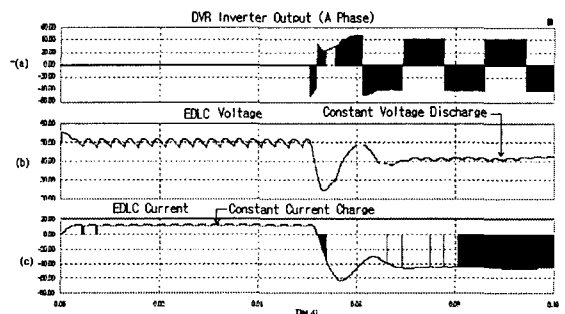


그림 4 DC/DC Converter의 EDLC 전압/전류 파형
Fig. 4 EDLC Voltage/Current of DC/DC Converter

그림 5는 입력 및 부하가 평형인 조건에서 (a)는 EDLC의 입출력 전류를, (b)에서는 EDLC양단 전압제어기의 출력전압 오차값을, (c)는 EDLC의 출력전류 오차값을 나타내고, (d)는 상보형 DC/DC컨버터 내에 있는 인덕터 양단의 전압을 나타낸 그림이다.

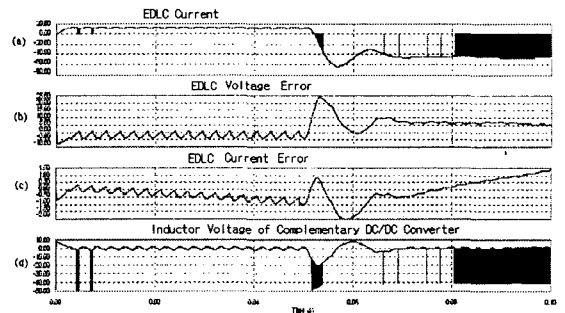


그림 5 DC/DC Converter의 제어기 오차
Fig. 5 EDLC control error of DC/DC Converter

그림 1에서처럼 EDLC의 고효율 운전을 위하여 전류원으로 충전하고, 전압원으로 방전하는 제어회로를 구성하여 EDLC의 충·방전 실험 결과를 그림 6에 나타내었다. 평상시 EDLC(채널 3)는 정전류로 충전되고 있고 Voltage sag 발생 시 방전모드로 전환하여 전류방향이 바뀌는 것을 볼 수 있다. 그림 7은 Voltage Sag 반복에 의한 EDLC의 충·방전시의 전류파형이다.

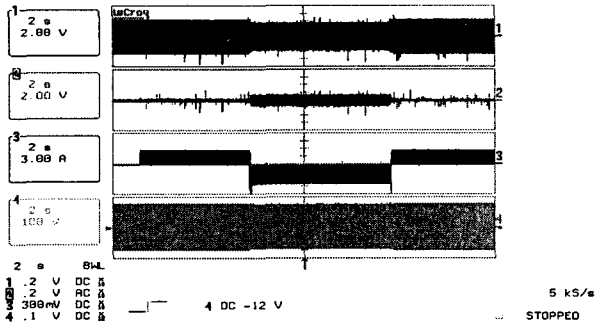


그림 6 EDLC의 충방전 실험 결과
Fig. 6 Charge - discharge of EDLC

(채널1:입력전압, 채널2:주입전압, 채널3:EDLC 전류, 채널4:부하전압)

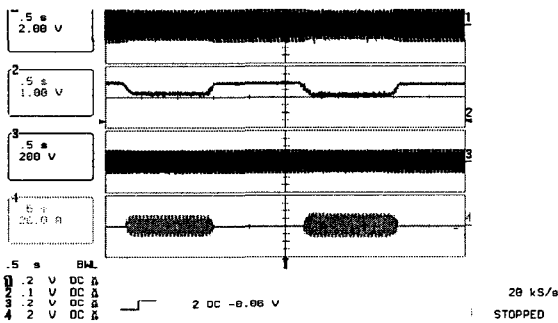


그림 7 Voltage sag 반복에 의한 EDLC의 충방전 특성
Fig. 7 Characteristic of EDLC

(채널1:입력전압, 채널2:입력전압의 RMS, 채널3:부하전압, 채널4:보상전류)

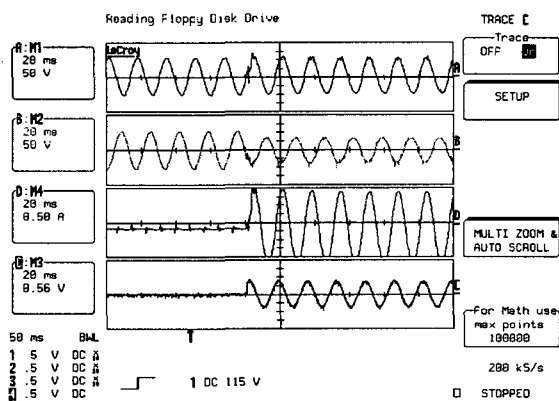


그림 8 DVR 동작의 시간확대 파형(보상 개시점)
Fig. 8 Extension waveform of DVR Operation
(Compensation starting point)

(채널A:부하전압, 채널B:입력전압, 채널C:출력전류, 채널D:보상전압)

그림 8과 그림 9는 EDLC 충·방전 제어를 수행했을 때 DVR의 동작을 보상 개시점과 종료점에 맞추어 시간을 확대한 파형이다.

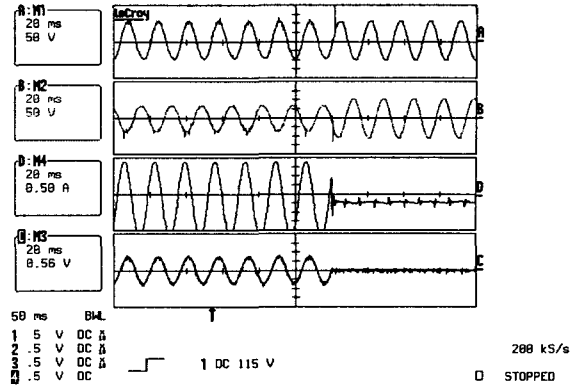


그림 9 DVR 동작의 시간확대 파형(보상 종료점)
Fig. 9 Extension waveform of DVR Operation
(Compensation ending point)

(채널A:부하전압, 채널B:입력전압, 채널C:출력전류, 채널D:보상전압)

4. 결론

전력품질의 저하 문제에서 큰 요소를 차지하는 순시적 전압강하를 해결하기 위한 효과적인 대안으로 직렬보상장치 또는 동적전압보상기(DVR)에 대한 연구가 최근 매우 활발하게 진행되고 있다. 그리고 DVR의 에너지 저장장치로는 납축전지와 전해커패시터의 장점을 모두 가진 EDLC의 적용이 도입되고 있다.

EDLC는 충·방전 제어에 따라 효율 및 수명에 직접적인 영향을 받는다. 따라서 충·방전시 각각의 제어를 수행해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 정전류 충전제어와 정전압 방전제어 기법을 제안하였다. 전체 시스템을 구성하여 실험한 결과 제안한 충·방전 제어에 의해 DVR 시스템의 성능이 향상됨을 입증하였다.

이 논문은 산업자원부의 '전력산업연구개발사업 (R-2004-0-033)의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참고 문헌

- [1] D. Mahinda Vilathgamuwa et al, "Voltage Sag Compensation With Energy Optimized Dynamic Voltage Restorer," IEEE Trans. Power Delivery, vol. 18, NO3, pp.928-936, July 2003.
- [2] 김종휘, "에너지저장 기술: 전기화학 축전기 신기술과 응용," 전력전자학회지, 제7권 제2호, pp.13-17, 2002.4.
- [3] W.E.Kazibwe et al, "Power quality : A Review", IEEE Computer Applications in Power, Vol.13, NO.1, pp39-42, January 1990.
- [4] M. F. Granaghan, "Dynamic Sag Corrector : Cost Effective Industrial Power Line Conditioning", IEEE IAS, pp.1339-1344, 1999.
- [5] Youngho Kim, "Ultracapacitor technology power electronics circuits", Power Electronics Technology, Oct. 2003.