

# 플라이휠 저장 에너지를 이용한 무순단 전압보상 기능을 갖는 UPS

이기수, 김중원, 변우열, 노의철, 김인동, 전태원\*, 김홍근\*\*  
 부경대학교, \*울산대학교, \*\*경북대학교

## Flywheel Energy Storage UPS with Voltage Compensation

K.S. Lee, J.W. Kim, W.Y. Byeon, E.C. Nho, I.D. Kim, T.W. Chun\*, H.G. Kim\*\*  
 Pukyong National University, \*University of Ulsan, \*\*Kyungpook National University

### ABSTRACT

This paper deals with the operation of a flywheel energy storage UPS. The ups has good features such as long life-time, improved efficiency, no environment problems, reduced size and space, and low maintenance cost compared with the conventional UPS using battery. The operating principle of the UPS is analysed in each mode including charging, voltage compensation, discharging, and voltage unbalance compensation. Especially, the tracking characteristic of the disturbed phase of the source voltage after outage is analysed. The usefulness of the operation is proved through simulations.

### 1. 서 론

전압 Sag, Swell, 전압불평형, 순간정전, 주파수 변동, 고조파 등의 전력품질 외란은 기기의 오동작과 시스템다운 가능성을 높이고 막대한 물적, 인적 손실을 초래할 수 있어 그 대책에 대한 필요성이 매우 절실하여 많은 연구결과가 발표되고 있다<sup>[1,2,3]</sup>. 대표적인 일반적 대책으로 UPS(Uninterruptible Power Supply)가 널리 사용되고 있으나 UPS의 에너지 저장 장치인 배터리는 효율이 낮고, 유해가스를 발생하여 환경에 영향을 많이 미치며, 수명이 짧아 주기적으로 교체해야하는 등 유지보수 비용이 높은 편이다. 반면 전기에너지를 회전체의 관성 에너지로 변환하여 저장한 다음 필요시 회생하여 저장된 에너지를 사용하는 플라이휠 에너지 저장 시스템은 수명이 반영구적이므로 반복 사용하더라도 유지 보수의 필요성이 거의 없으며 환경 친화적인 장점을 가지고 있다<sup>[4]</sup>. 또한 차지하는 공간도 배터리 방식에 비해 30~40% 정도 밖에 안되어

도심지의 IDC(Internet Data Center), 은행, 서비스 센터 등에 적용이 확대되고 있다.

이러한 에너지 저장 시스템은 최근 들어 공급 전원에 이상이 감지된 후 예비 발전기가 기동하여 부하에 전력을 공급 가능하게 될 때까지의 수~수십 초간의 에너지 공급 공백을 없애기 위한 단기간 에너지 저장 장치로서 각광을 받고 있다.

본 논문에서는 플라이휠 저장 에너지를 이용한 UPS의 입력 전압이 불평형인 경우 전압을 보상하는 동작 원리와 제어 방법, 그리고 순간 정전 후 전원 재인가 시 전원 전압의 위상 변동이 있는 경우 신속히 이를 추종하는 특성을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 분석하고자 한다.

### 2. 플라이휠 저장 에너지 UPS 구성 및 동작

#### 2.1 플라이휠 저장 에너지 UPS 구성

본 논문에서 제안한 플라이휠 저장 에너지 UPS는 그림 1과 같이 SSTS(Solid State Transfer Switch), 전압 보상용 직렬 변압기(Serial Transformer), 필터, PWM CONV/INV, PWM INV/CONV, Flywheel M/G로 구성된다.

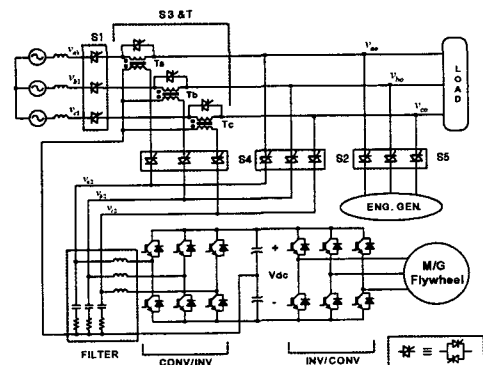


그림 1 플라이휠 저장 에너지 UPS 구성  
 Fig. 1 Flywheel energy storage

플라이휠 저장 에너지 UPS는 크게 충전 모드, 전압 보상 모드, UPS 모드 등 세 개의 동작 모드를 가지고 있다.

먼저 충전 모드는 입력되는 전원 전압이 정상일 경우에 작동하는 모드로 입력 전원으로부터 플라이휠에 에너지를 저장하는 동작이 이루어진다.

전압 보상 모드에서는 전원 전압에 Sag, Swell 등이 발생하였을 때 플라이휠에 저장된 에너지를 전압 보상을 직렬 변압기를 통해 보상해 준다.

전원 전압이 50% 이하로 내려가게 되면 UPS 모드로 동작하여 전원 측의 SSTS를 차단해 전력의 역류를 막고 플라이휠의 에너지로 부하에 전원을 공급하게 된다.

플라이휠 저장 에너지 UPS에는 정전 시간이 길어지는 경우 사용할 디젤 엔진 발전기와 이를 연결시키기 위한 SSTS(S5)가 포함되어 있다. 그리고 직렬 변압기는 전압 보상 모드에서만 사용되므로 그 외의 모드에서 바이패스 하기 위해 SSTS(S3)가 설치되어 있다.

## 2.2 PLL 동작 원리

입력 전원 전압에 Sag, Swell, 전압불평형, 위상 지연 등의 문제가 발생하였을 때, 부하단에 인가해 주어야 할 기준 전압과의 차이를 UPS에서 보상해 주게 된다. 이때 부하단에 인가할 기준 전압을 PLL(Phase Locked Loop)을 통해 만들어 내었다. 그림 2는 본 연구에서 사용한 PLL의 블록 다이어그램이다.

세 상의 전압을 입력받아 이를 d-p 정지 좌표계로 변환하고 이를 다시 d-p 회전 좌표계로 변환한 다음 이중 d-축 좌표를 일정하게 유지하여 기준 전압의 위상을 제어하게 된다. 좌표 변환을 위한 수식은 각각 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{as} \\ (U_{cs} - U_{bs})/\sqrt{3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} U_{qe} \\ U_{de} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta^*) & -\sin(\theta^*) \\ \sin(\theta^*) & \cos(\theta^*) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_{qs} \\ U_{ds} \end{bmatrix} \quad (2)$$

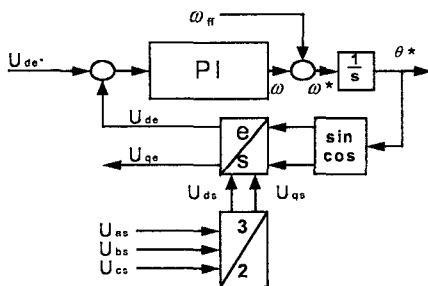


그림 2 PLL 블록 다이어그램

Fig. 2 Block diagram of the PLL

이를 통해 전원 전압의 위상 변이 뿐만 아니라 UPS 동작 후 정상적인 전원 전압이 재인가 될 때에도 즉시 위상을 일치시켜주게 된다.

각 모드별로 동작을 상세히 분석하면 다음과 같다.

## 2.3 전압 보상 모드

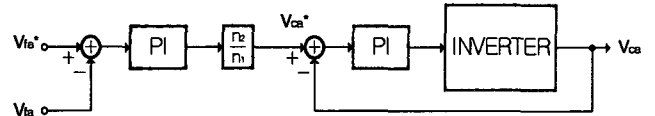


그림 3 전압 보상 모드 제어기 블록 다이어그램

Fig. 3 Block diagram of the controller for the voltage compensation mode

입력 전원에 Sag나 Swell, 또는 전압불평형 등의 문제가 발생하면 이를 보상하기 위해 다이내믹 UPS는 전압 보상 모드로 동작한다. 이 경우에는 플라이휠에 저장된 에너지를 컨버터를 통해 DC 링크 전압을 일정하게 유지하고, 인버터로 보상해야 할 전압을 직렬 변압기를 통해 인가한다.

그림 3는 전압 보상 모드에서 a상에 대한 제어 블록 다이어그램이다. 부하에 인가되는 전압과 기준 전압과의 차이만큼 변압기의 2차 측에 인가해 준다. 이때 n1과 n2는 변압기의 1차 측과 2차 측의 권선비를 의미한다.

## 2.3 전원 상태별 동작 모드

그림 4는 전원 상태에 따른 플라이휠 저장 에너지 UPS의 동작 모드와 각 SSTS의 상태, CONV/INV의 동작을 정리한 것이다. INV/CONV의 동작상태는 CONV/INV와 반대이다.

그림 4에서 보듯이 전원이 정상인 상태에서는 충전 모드로 S1, S2, S3을 ON하고 전원을 부하에 그대로 인가하여 직렬 변압기는 바이패스하고 컨버터와 연결한다. 이때 CONV/INV는 컨버터로 작동한다. 전원에 Sag, Swell 등이 발생하면 전압 보상

Source	Normal	Sag/Swell	Normal	Short Outage	Normal	Long Outage	Normal
Mode	Charging	Vol. Comp.	Charging	UPS	Charging	UPS	Charging
S1		ON		OFF			
S2	ON	OFF			ON		
S3	ON	OFF			ON		
S4	OFF	ON		OFF			
S5				OFF		ON	
CONV/INV	CONV	INV	CONV	INV	CONV	INV	CONV

그림 4 전원상태에 따른 동작모드

Fig. 4 Operating mode with the source condition

모드로 S2와 S3은 OFF하고 S4를 ON하여 직렬 변압기를 활성화해 전압을 보상해 준다. 이때의 CONV/INV는 인버터로 작동한다. 전원에서 순간 정전이 발생하게 되면 UPS 모드가 되어 S1을 OFF하여 전원을 차단한다. 만약 정전 시간이 길어지면 플라이휠에 저장된 에너지가 모두 소모되기 전에 외부에 장착된 엔진 제너레이터를 동작시키고 S5를 ON하여 전원을 공급한다. 이때 다이내믹 UPS는 충전 모드로 동작하여 플라이휠에서 소모된 에너지를 다시 저장한다.

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 5는 플라이휠 저장 에너지 UPS의 시뮬레이션에 사용된 회로도이고 표 1은 시뮬레이션 파라미터이다.

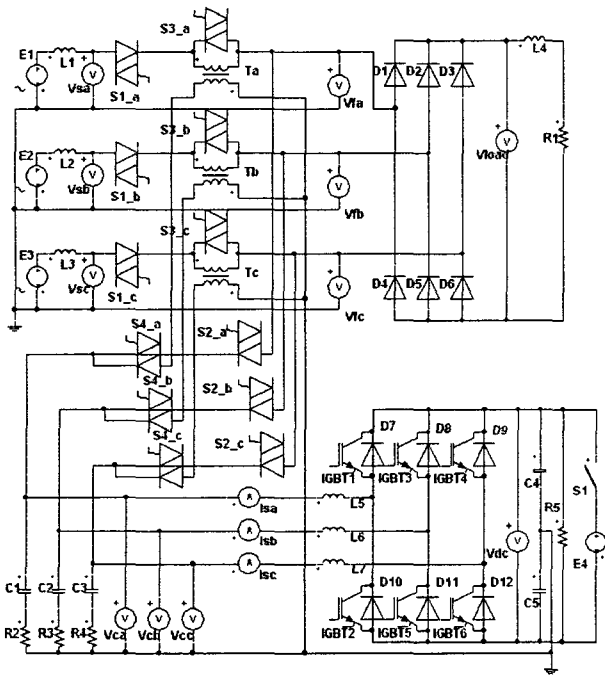


그림 5 UPS 시뮬레이션 회로도  
Fig. 5 Simulation circuit for the UPS

표 1 시뮬레이션 파라미터  
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Source voltage	3 $\phi$ , 220V, 60Hz
Load(L, RL)	2mH, 20 $\Omega$
DC link voltage	400V
Switching frequency	5kHz
Filter(Cf, Lf, Rf)	280 $\mu$ F, 0.5mH, 0.5 $\Omega$

시뮬레이션에서 플라이휠은 PWM제어를 통해 쉽게 구동할 수 있으므로 제외하고 대신 전압 보상 모드와 UPS 모드에서 사용하기 위해 400V DC 전압원을 연결하여 시뮬레이션 하였다. 샘플링 시간은 1 $\mu$ s 이고, 각각 250ms 까지 시뮬레이션 하였다. 각 모드에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 전압 보상 모드

그림 6은 전압 보상 모드에서의 시뮬레이션 결과이다. 입력 전원 전압에 임의로 50ms 에서 20% Sag를 발생시켰고 100ms 에서 40% Sag를 발생시킨 뒤 150ms 에서 정상 전원으로 복구하였다.

$V_{sa}$ ,  $V_{sb}$ ,  $V_{sc}$ 는 입력 전원 전압이고,  $V_{fa}$ ,  $V_{fb}$ ,  $V_{fc}$ 는 부하에 인가되는 전압이며,  $V_{ca}$ ,  $V_{cb}$ ,  $V_{cc}$ 는 컨버터에서 직렬 변압기 2차측에서 보상하여주는 전압이다. 그림 6에서 보이는 바와 같이 입력 전원 전압에 Sag가 발생하더라도 부하단에는 정상적인 전압이 인가되고 있음을 알 수 있다.

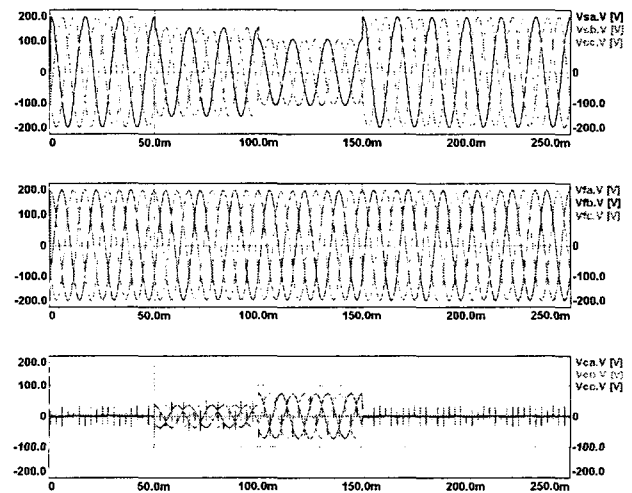


그림 6 전압 보상 모드 시뮬레이션 결과  
Fig. 6 Simulation result in voltage compensation mode

#### 3.2 전압불평형 모드

그림 7은 입력 전원에 전압불평형이 일어났을 경우의 시뮬레이션 결과이다. 이 시뮬레이션을 위해서 50ms 에서 100ms 까지 a상 전압은 그대로 두고 b상과 c상 전압을 50%로 줄였다. 그리고 150ms 에서 200ms 까지 마찬가지로 a상 전압은 그대로 두고 b상과 c상 전압을 50%로 줄인 뒤 7차 고조파를 추가하고 b상과 c상을 각각  $-15^\circ$ 와  $+15^\circ$ 로 위상변조 하였다. 전압불평형이 일어나더라도 각 상이 독립적으로 제어되어 부하에는 항상 정상적인 전압을 공급하여줄 수 있음을 알 수 있다.

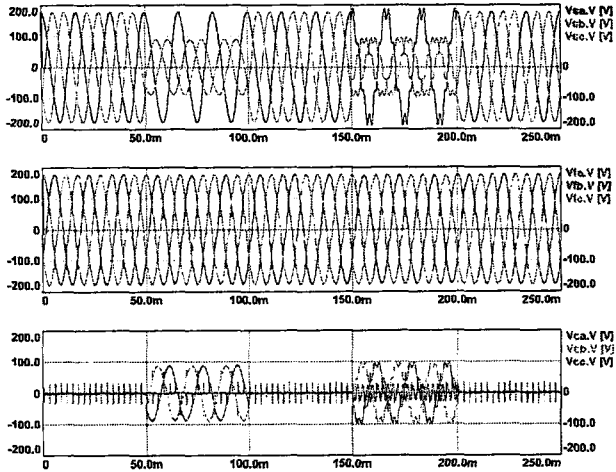
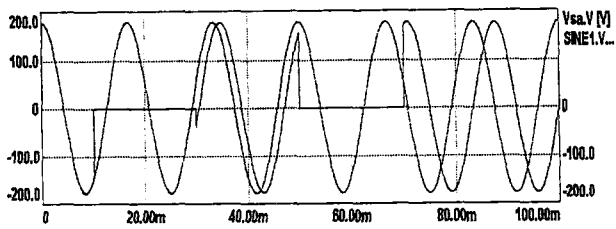


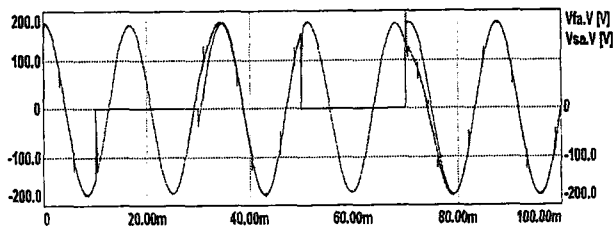
그림 7 전압불평형 시뮬레이션 결과  
Fig. 7 Simulation result in voltage unbalance

### 3.3 위상 변위된 전원 전압 재인가시 추종 특성

계통의 사고로 인한 Outage 발생 후 공급 전원이 정상으로 재인가되는 경우 이전의 전압에 비해 위상이 변동될 수가 있다. 이러한 경우 UPS 모드에서 정상 모드로 전환될 때 위상 보정이 이루어져서 전원 전압을 추종할 수 있어야 한다.



(a)

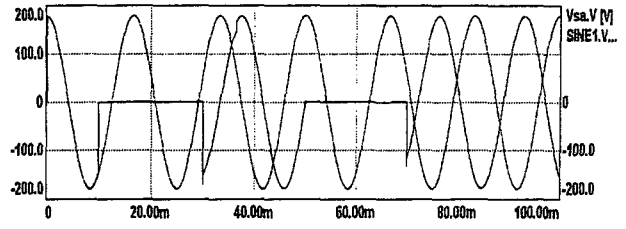


(b)

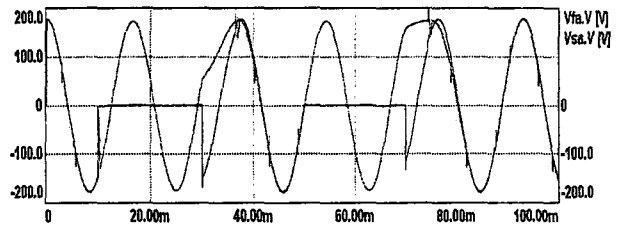
그림 8 전원 전압 30°, 60° 지상 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Simulation result in 30°, 60° leading source voltage

그림 8은 전원 전압이 30°와 60°지상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 그림 (a)는 초기의 전원 전압과 위상 지연된 전원 전압 파형을 보여주고 있다. 그림 (b)는 위상 지연된 전원 전압과 보상이 된 부하 전압을 보여주고 있다. 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 30°와 60°지상인

상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.



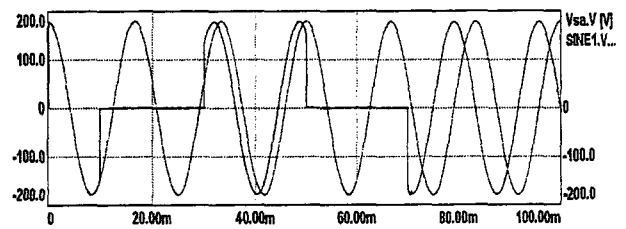
(a)



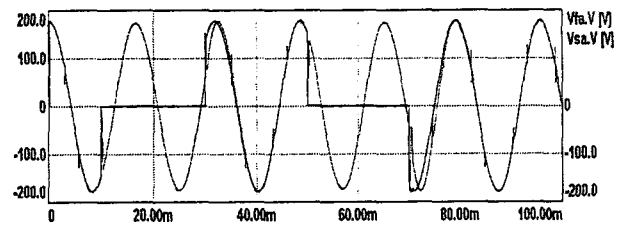
(b)

그림 9 전원 전압 90°, 120° 지상 시뮬레이션 결과  
Fig. 9 Simulation result in 90°, 120° leading source voltage

그림 9는 전원 전압이 90°와 120°지상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 마찬가지로 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 90°와 120°지상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 10 전원 전압 30°, 60° 진상 시뮬레이션 결과  
Fig. 10 Simulation result in 30°, 60° leading source voltage

그림 10은 전원 전압이 30°와 60°진상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 30°와 60°만큼 진상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.

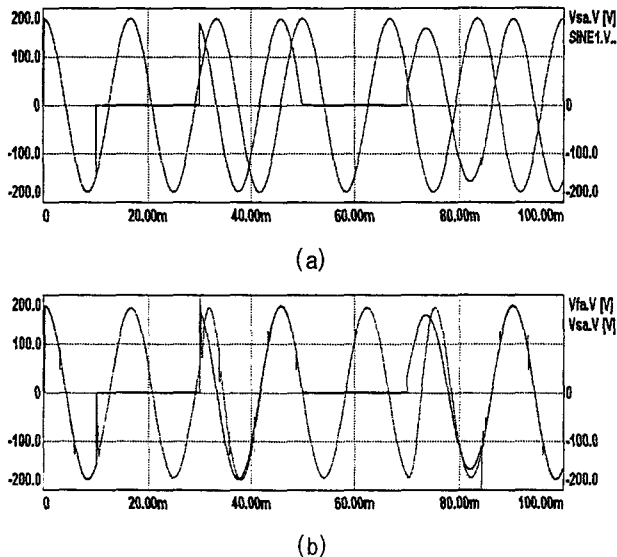


그림 11 전원 전압 90°, 120°진상 시뮬레이션 결과  
Fig. 11 Simulation result in 90°, 120° leading source voltage

그림 11은 전원 전압이 90°와 120°진상 되었을 때의 시뮬레이션 파형이다. 10ms와 30ms에서 전원 전압이 0이 되어 UPS모드로 동작하고 50ms와 70ms에서 정상 전원이 각각 90°와 120°만큼 진상인 상태로 인가되었으나 그림 (b)에서 보는바와 같이 1 사이클 안에 정상 전원과 위상을 일치시키고 있음을 알 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 플라이휠 저장에너지를 이용한 UPS의 전압 보상, 전압불평형 보상, 위상 변위된 전원 전압 재인가시 추종 특성 등에 대해 분석하였다. 정상시에는 플라이휠에 에너지를 저장하여 두었다가 Sag, Swell, 전압불평형 등이 발생하였을 때 이를 보상하여 전력 품질을 향상시키고, 부하에 안정된 전압을 공급하며, 순간정전, 전압불평형, 단락 등의 사고가 발생했을 때 부하를 보호할 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 또한 정전 발생 후 공급 전원이 재인가 될 경우 원래의 공급 전원에 비해 위상이 임의로 변위되어있다 하더라도 1 사이클 이내에 전원 전압의 위상을 추종할 수 있음

을 확인하였다. 추후 실험을 통하여 성능을 확인하여 그 유용성을 입증할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제(02-중-02)임

#### 참 고 문 헌

- [1] Sergio Augusto Oliveira da Silva, Pedro F. Donoso-Garcia, Porfirio C. Cortizo, Paulo F. Seixas, "A comparative analysis of control algorithms for three-phase line-interactive UPS systems with series-parallel active power-line conditioning using SRF method," IEEE-PESC 2000, Vol. 2, pp. 1023-1028, 2000
- [2] Sergio Augusto Oliveira da Silva, Pedro F. Donoso-Garcia, Porfirio C. Cortizo, Paulo F. Seixas, "A three-phase line- interactive UPS system implementation with series-parallel active power-line conditioning capabilities," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 38, pp. 1581-1590, 2002
- [3] Vikram Kaura, Vladimir Blasko, "Operation of a phase locked loop system under distorted utility conditions," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 33, pp. 58-63, 1997
- [4] Robert S. Weissbach, George G. Karady, Richard G. Farmer, "A combined uninterruptible power supply and dynamic voltage compensator using a flywheel energy storage system," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, pp. 265-270, 2001