

# 플라이휠 저장 에너지를 이용한 다이내믹 UPS 동작 특성 분석

## Operating characteristics analysis of Dynamic UPS using Flywheel Energy Storage Element

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

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 describes a dynamic UPS system with flywheel energy storage element. There are three operating modes of charging, voltage compensation, and UPS. The operating principle of each mode is analyzed and simulated. The simulation results show the validity of the operation of the proposed scheme.

유해 가스가 발생하지 않으므로 환경 친화적인 장점을 가지고 있다[2]. 또한 설치 공간도 배터리에 비해 30~40% 정도 밖에 안되어 도심지의 IDC(Inter Data Center), 은행, 서비스 센터 등에 적용이 확대되고 있다.

본 논문에서는 플라이휠을 이용한 Dynamic UPS의 동작 원리와 제어 방법을 분석하고 시뮬레이션을 통하여 그 성능을 입증하고자 한다.

### 1. 서 론

산업 현장 및 일상 생활에서 사용되는 수많은 장비와 기기들이 그 성능과 사용의 편의성 등을 이유로 점차 정밀화, 디지털화 되어가고 있다. 이러한 정밀 기기들이 그 성능을 제대로 발휘하기 위해서는 기기들이 요구하는 전압 및 주파수 등의 사양을 만족시켜 주어야 한다.

전력 계통에 대한 기술 발달로 전력 공급은 날로 우수해지고 안정화되어 장시간 정전이 발생하는 경우는 거의 없어졌지만 예기치 못한 사고로 인한 일시적, 국부적인 Sag, Swell, 순간정전, 주파수 변동, 고조파 등 외란의 발생은 의외로 빈번히 발생하고 있는 실정이다. 이러한 전력품질 외란은 기기의 오동작과 파손을 야기하며 막대한 물적, 인적 손실을 불러 올 수 있어 그 대책에 대한 필요성이 매우 절실하다[1, 3, 4]. 그러한 대책의 일환으로 일반적으로 UPS(Uninterruptible Power Supply)가 널리 사용되고 있다.

현재 UPS에서 사용되고 있는 대표적인 에너지 저장 장치인 배터리는 효율이 낮고, 유해 가스를 발생하여 환경에 영향을 많이 미치며, 수명이 짧아 주기적으로 교체해야하는 등 유지보수 비용이 높은 편이다. 또한 충전된 상태를 모니터링하기가 힘들며 온도에 상당히 민감하고 시스템이 차지하는 부피가 매우 크다는 단점도 있다. 반면 전기에너지를 회전체의 관성 에너지로 변환하여 저장한 다음 필요시 회생을 하여 저장된 에너지를 사용하는 플라이휠 에너지 저장 시스템은 수명이 반영구적이므로 반복 사용하더라도 유지 보수의 필요성이 거의 없으며

### 2. 다이내믹 UPS 구성 및 동작

#### 2.1 다이내믹 UPS 구성

플라이휠을 이용한 다이내믹 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.

플라이휠을 이용한 다이내믹 UPS는 크게 충전 모드, 전압 보상 모드, UPS 모드 등 세 개의 동작 모드를 가지고 있다.

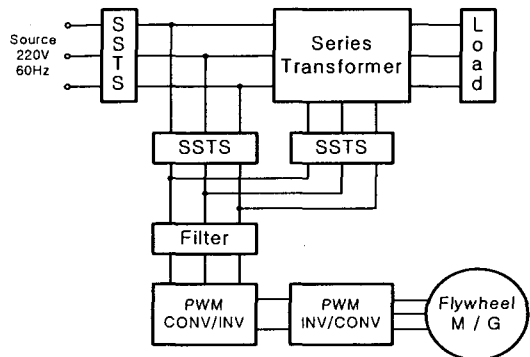


그림 1 다이내믹 UPS 구성  
Fig. 1 Dynamic UPS Configuration

먼저 충전 모드는 입력되는 전원 전압이 정상 일 경우에 작동하는 모드로 소스 전원으로부터 플라이휠에 에너지를 저장하는 동작이 이루어진다.

전압 보상 모드에서는 전원 전압에 Sag 또는 Swell이 발생하였을 때 플라이휠에 저장된 에너지를 전압 보상을 직렬 변압기를 통해 보상에 준다.

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

그림 2는 본 논문에서 제안한 다이내믹 UPS의 주 회로도도를 나타낸다. 주 회로도에는 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. 그 외의 부분은 그림 1과 동일하다.

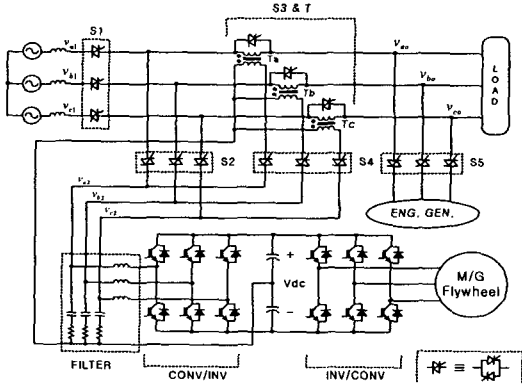


그림 2 다이내믹 UPS의 주 회로도  
Fig. 2 Main circuit diagram of the dynamic UPS

각 모드별로 동작을 상세히 분석하면 다음과 같다.

### 2.2 충전 모드

입력 전원에 아무런 문제가 없을 때에는 전원을 그대로 부하에 인가한다. 그리고 다이내믹 UPS는 충전 모드로 동작하여 교류 입력 전원을 CONV/INV로 직류로 변환하여 DC 링크 전압을 일정하게 유지하고, 인버터로 플라이휠이 일정한 속도로 회전하도록 한다.

그림 3은 충전 모드에서 a상에 대한 제어 블록 다이어그램이다. DC 링크 단의 전압 Vdc와 지령치인 Vdc\*의 차이를 전압제어기에서 제어하고, 이것을 다시 전류제어기를 통해 상전류를 제어한다. 그 결과 DC 링크의 전압은 일정하게 유지되고 전원 측에서 흐르는 전류는 전압과 동상이 되어 역율은 1로 제어된다.

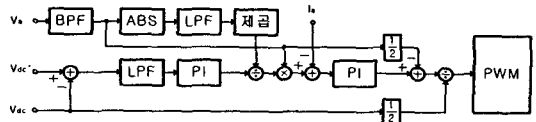


그림 3 충전 모드 제어기 블록 다이어그램  
Fig. 3 Block diagram of the controller for the charging mode

### 2.3 전압 보상 모드

입력 전원에 Sag나 Swell, 또는 전압불평형 등의 문제가 발생하면 이를 보상하기 위해 다이내믹 UPS는 전압 보상 모드로 동작한다. 이때는 플라이휠에 저장된 에너지를 컨버터를 통해 DC 링크 전압을 유지하고, 인버터로 보상해야 할 전압을 직렬 변압기를 통해 인가한다. 이때 보상하여 줄 수 있는 전압의 범위는 ±50% 이다.

그림 4는 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 권선 비를 의미한다.

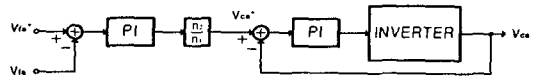


그림 4 전압 보상 모드 제어기 블록 다이어그램  
Fig. 4 Block diagram of the controller for the voltage compensation mode

### 2.4 UPS 모드

전원측 전압강하가 50%를 넘어가게 되면 다이내믹 UPS는 UPS 모드로 동작한다. 이때 전원부와 연결된 SSTS(S1)은 차단하여 전력의 역류를 방지한다.

그림 5는 UPS 모드에서 a상에 대한 제어 블록 다이어그램이다. UPS 모드에서는 변압기를 거치지 않고 부하단과 직접 연결이 되어 인버터의 출력이 필터를 거친 후 부하에 인가되게 된다.

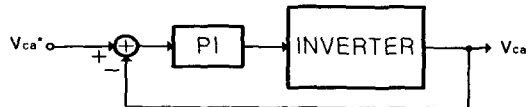


그림 5 UPS 모드 제어기 블록 다이어그램  
Fig. 5 Block diagram of the controller for the UPS mode

## 2.5 전원 상태별 동작 모드

그림 6은 전원 상태에 따른 다이내믹 UPS의 동작 모드와 각 SSTS의 상태, CONV/INV의 동작을 정리한 것이다. INV/CONV의 동작 상태는 CONV/INV와 반대이다.

그림 6에서 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 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.

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 6 전원상태에 따른 동작모드  
Fig. 6 Operating mode with the source condition

## 3. 시뮬레이션

그림 7은 다이내믹 UPS의 시뮬레이션에 사용된 회로도이고 표 1은 파라미터이다. 시뮬레이션에서는 실험의 편의성을 위해 SSTS 대신 이상적인 스위치를 사용하였고 플라이휠은 PWM제어를 통해 쉽게 구동할 수 있으므로 제외하고 DC 링크까지만 시뮬레이션 하였다. 샘플링 시간은  $1\mu s$ 이고, 각각 240ms까지 시뮬레이션 하였다.

각 모드에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

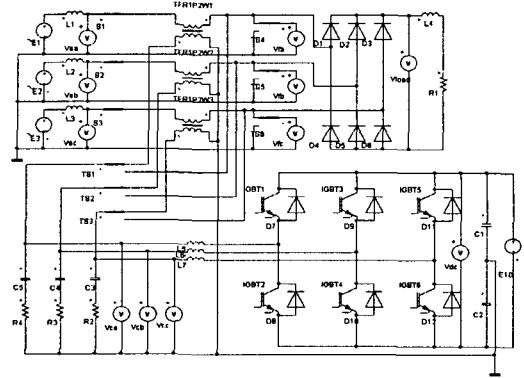


그림 7 다이내믹 UPS 시뮬레이션 회로도  
Fig. 7 Simulation circuit for the Dynamic UPS

표 1 시뮬레이션 시스템 파라미터  
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Source voltage	220V, 60Hz
Load(L, RL)	5mH, 4Ω
DC link voltage	400V
Switching frequency	5kHz
Filter(Cf, Lf, Rf)	280uF, 0.5mH, 0.5Ω

### 3.1 충전 모드 시뮬레이션 결과

그림 8은 충전 모드에서의 시뮬레이션 결과이다. 입력 전원 전압과 부하 전압이 일치하고 DC 링크 전압이 400V로 충전된 뒤 일정하게 유지하고 있다.

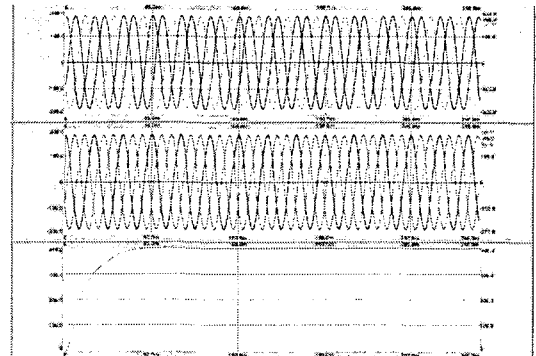


그림 8 충전 모드 시뮬레이션 결과  
Fig. 8 Simulation result in charging mode

### 3.2 전압 보상 모드 시뮬레이션 결과

그림 9는 전압 보상 모드에서의 시뮬레이션 결과이다. 입력 전원 전압에 임의로 50ms에서 20% Sag를 발생시켰고 100ms에서 40% Sag를 발생시킨 뒤 150ms에서 다시 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 9에서 보이는 바와 같이 입력 전원 전압에 Sag가 발생하더라도 부하 단에는 정상적인 전압이 인가되고 있음을 알 수 있다.

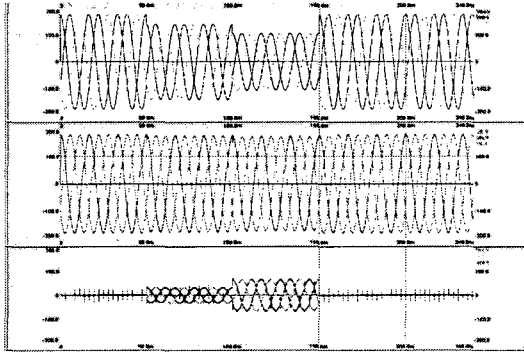


그림 9 전압 보상 모드 시뮬레이션 결과  
Fig. 9 Simulation result in voltage compensation mode

### 3.3 UPS 모드 시뮬레이션 결과

그림 10은 UPS mode에서의 시뮬레이션 결과이다. 입력 전원 전압을 임의로 50ms와 150ms에서 차단하고 100ms와 200ms에서 다시 인가해 주었다.

그림 10에서 보이는 바와 같이 입력 전원 전압이 차단되더라도 다이내믹 UPS에서 정상 전원을 만들어 부하에 인가해 주고 있음을 알 수 있다.

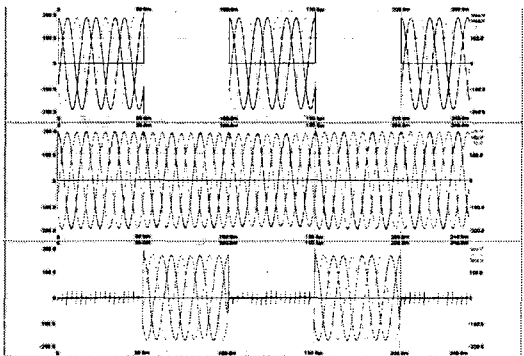


그림 10 UPS 모드 시뮬레이션 결과  
Fig. 10 Simulation result in UPS mode

### 3.4 전체 시뮬레이션

그림 11은 플라이휠 저장에너지를 이용한 다이내믹 UPS의 전체적인 실험 결과이다. 전원 전압을 40ms부터 120ms까지 점차 감소시켰다가 200ms까지 다시 증가시켰을 때 다이내믹 UPS의 동작 특성을 잘 나타내고 있다. 정상 전원에서는 충전 모드로 동작하다가 전원에 이상이 생기면 전압 보상 모드로 출력 전압을 보상해 주고, 전원 전압이 50% 이하로 감소하게 되면 UPS 모드로 동작하여 부하에는 전원 전압의 이상유무와 상관없이 양질의 정현파 전압이 인가되고 있음을 알 수 있다.

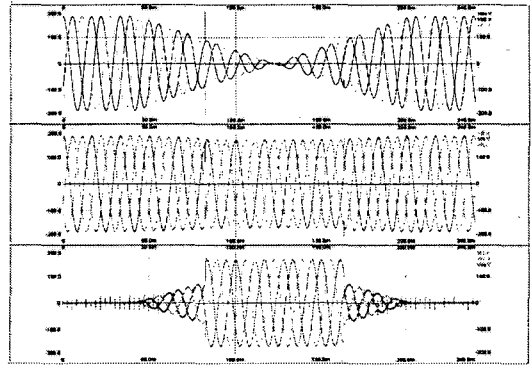


그림 11 전체 시뮬레이션 결과  
Fig. 11 Simulation result in all modes

## 4. 결 론

본 논문에서는 플라이휠 저장에너지를 이용한 다이내믹 UPS의 동작에 대해 분석하였다. UPS에서 대표적인 에너지 저장장치로 사용되는 배터리 대신 수명이 반영구적이고 크기가 작으며, 환경 친화적인 플라이휠을 사용하여 다이내믹 UPS를 구성하였다. 정상시에는 플라이휠에 에너지를 저장하여 두었다가 Sag, Swell, 전압불평형 등이 발생하였을 때 이를 보상하여 전력 품질을 향상시키고, 부하에 안정된 전압을 공급하며, 순간정전, 단락 등의 사고가 발생했을 때 부하를 보호할 수 있음을 확인하였다. 각 모드별 그리고 전체에 대한 시뮬레이션을 통해서 다이내믹 UPS의 올바른 동작 특성을 확인할 수 있었다. 본 논문에서 제안한 플라이휠 저장에너지를 이용한 다이내믹 UPS의 타당성을 시뮬레이션으로 검증하였고, 차후 실험을 통하여 효용성을 입증할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초 전력공학 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] 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
- [3] 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
- [4] 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