

플라이휠 저장 에너지를 이용한 무순단 전압보상 기능을 갖는 UPS

李起守[†], 金重元^{*}, 魯義哲[†], 全泰園^{**}, 金仁東^{***}, 金興根^{****}, 李弘熙^{**}

Flywheel Energy Storage UPS with Voltage Compensation

K. S. Lee, J. W. Kim, E. C. Nho, T. W. Chun, I. D. Kim, H. G. Kim, and H. H. Lee

요 약

본 논문에서는 플라이휠의 저장에너지를 이용한 다이내믹 무정전 전원장치를 제안하고 동작기능을 분석하였다. 배터리를 에너지 저장요소로 사용하고 있는 기존의 무정전 전원장치에 비해 플라이휠 방식의 무정전 전원장치는 수명이 길고, 효율이 높으며, 환경공해가 거의 없으며, 크기도 작고, 특히 유지보수 비용이 현저히 작다는 장점을 갖는다. 무정전 기능뿐 아니라 전압보상 기능도 갖는 시스템에 대한 동작특성을 해석하였으며, 순간정전 후 전압이 복구되는 시점에서의 위상변동을 신속히 추종하는 특성도 살펴보았다. 시뮬레이션과 실험을 통해서 시스템의 유용성을 검증하였다.

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 environmental 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 voltage compensation as well as uninterruptible power supply. Especially, the tracking characteristic of the disturbed phase of the source voltage after outage is analysed. The usefulness of the system is proved through simulations and experiments.

Key words : Dynamic UPS, PLL, voltage compensation, flywheel

1. 서 론

전압 Sag, Swell, 전압불평형, 순간정전, 주파수 변동, 고조파 등의 전력품질 외란은 기기의 오동작이나 시스템 정지사고를 초래할 가능성이 있으며 이러한 경

우 발생하는 막대한 손실을 사전에 방지하기 위한 대책으로 전력품질 개선장치에 대한 연구가 활발히 진행되어 왔다^[1-3]. 대표적인 일반적 대책으로 UPS (Uninterruptible Power Supply)가 널리 사용되고 있으나 UPS의 에너지 저장 장치인 배터리는 효율이 낮고, 유해 가스를 발생하여 환경에 영향을 많이 미치며, 수명이 짧아 주기적으로 교체해야하는 등 유지보수 비용이 높은 편이다. 반면 전기에너지를 회전체의 관성 에너지로 변환하여 저장한 다음 필요시 회생을 하여 저장된 에너지를 사용하는 플라이휠 에너지 저장 시스템은 수명이 반영구적이므로 반복 사용하더라도 유지보수의 필요성이 거의 없으며 환경 친화적인 장점을

[†]교신저자 : 정회원, 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수
E-mail : nhoc@pknu.ac.kr

^{*}정회원, 부경대 대학원 전기공학과 졸업

^{**}정회원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수

^{***}정회원, 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수

^{****}정회원, 경북대 전자전기공학부 교수

접수일자 : 2004. 12. 31 1차 심사 : 2005. 2. 5

2차 심사 : 2005. 2. 22 심사완료 : 2005. 3. 4

가지고 있다^[4]. 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. 이러한 경우 전원전압, 인버터 출력전압, 예비발전기 출력전압 간의 스위칭시 동기를 맞추는 것이 중요하다. 만약 비동기로 인한 위상점프(phase jump)가 발생하면 과도한 돌입전류 등으로 부하에 손상을 줄 수 있다^[5-6].

본 논문에서는 플라이휠 저장 에너지를 이용한 다이나믹 UPS의 입력 전압강하 및 정전시 전압보상의 동작 원리와 제어 방법, 그리고 순간 정전 후 전원 재인가 시 전원 전압의 위상 변동이 있는 경우 신속히 이를 추종하는 특성을 분석하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 성능을 확인하고자 한다.

2. 플라이휠 저장에너지 UPS 구성 및 동작

2.1 플라이휠 저장에너지 UPS 구성

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

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 모

드에서 바이패스 하기 위해 SSTS(S3)가 설치되어 있다.

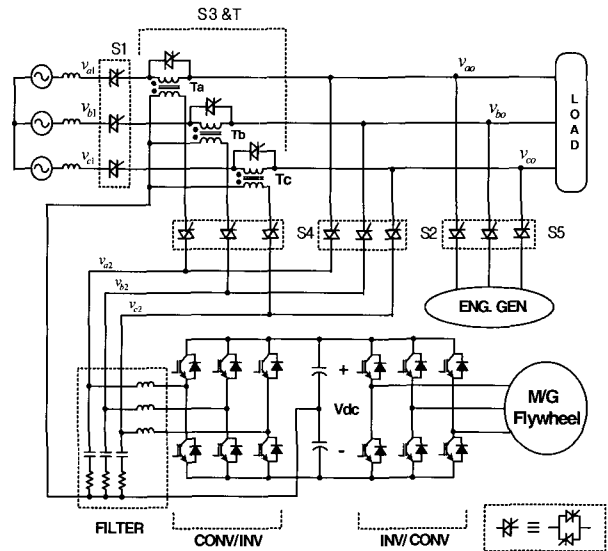


그림 1 플라이휠 저장 에너지 UPS 구성
Fig. 1 Flywheel energy storage UPS

2.2 전체시스템 제어구성도

그림 2는 전체 시스템에 대한 제어구성도 및 각 제어보드 사이에 전송되는 정보를 나타낸다. 호스트 컴퓨터는 시스템의 기동 및 정지명령과 각 부분의 데이터를 송수신 한다. 시퀀스 제어보드는 호스트 컴퓨터로부터 받은 명령 뿐 아니라, 자체적으로 감지한 신호값을 토대로 현 상황에서 필요한 동작보드(충전, 전압 보상, UPS 모드)를 결정한다. 결정된 동작모드에 따라 SSTS, 접촉기, 차단기의 온/오프 동작 및 CONV/INV, INV/CONV의 동작이 이루어진다.

그림 3은 전원 상태에 따른 플라이휠 저장 에너지 UPS의 동작 모드와 각 SSTS의 상태, CONV/INV의 동작을 정리한 것이다. INV/CONV의 동작상태는 CONV/INV와 반대이다. 그림 3에서 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 보상모드로 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.

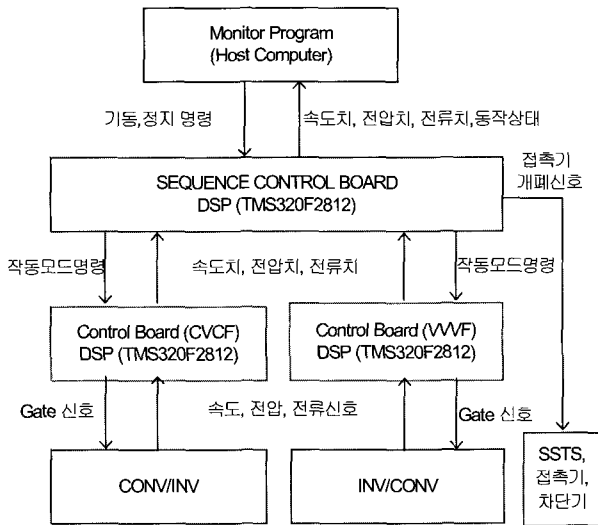


그림 2 전체 시스템 제어구성도
Fig. 2 Control block diagram for the system

	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 3 전원상태에 따른 동작모드
Fig. 3 Operating mode with the source condition

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.

2.3 PLL 동작원리

입력 전원 전압에 Sag, Swell, 전압불평형, 위상 지연 등의 문제가 발생하였을 때, 부하단에 인가해 주어야 할 기준 전압과의 차이를 UPS에서 보상해주게 된다. 이때 부하단에 인가할 기준 전압을 PLL(Phase

Locked Loop)을 통해 공급한다. 그림 4는 본 논문에서 사용한 PLL의 블록 다이어그램이다.

세 상의 전원전압을 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.

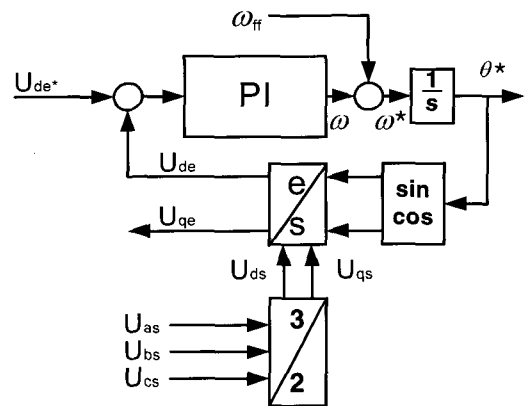


그림 4 PLL 블록 다이어그램
Fig. 4 Block diagram of the PLL

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

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

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

2.4 전압보상 모드

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 보상해야할 전압을 직렬 변압기를 통해 인가한다.

그림 5는 전압보상 모드에서 a상에 대한 제어 블록 다이어그램이다. 부하에 인가되는 전압과 기준 전압과의 차이만큼 변압기의 2차 측에 인가해 준다. 이때 n_1 과 n_2 는 각각 변압기의 1차측과 2차측의 권선수를 의미한다.

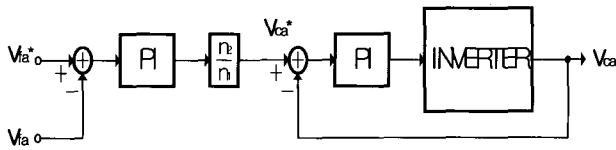


그림 5 전압 보상 모드 제어기 블록 다이어그램
Fig. 5 Controller block diagram for the voltage compensation mode

3. 시뮬레이션 결과

그림 1에 대한 시뮬레이션을 하였으며 표 1은 시뮬레이션 파라미터를 나타낸다. 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 μ s 이고, 각각 250ms 까지 시뮬레이션 하였다.

각 모드에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

표 1 시뮬레이션 파라미터
Table 1 Simulation parameters

Parameters	Value
Source voltage	3 Φ , 220V, 60Hz
Load(L, R _L)	2mH, 20 Ω
DC link voltage	400V
Switching frequency	5kHz
Filter(C _f , L _f , R _f)	280 μ F, 0.5mH, 0.5 Ω

3.1 전압보상 모드

그림 6은 전압보상 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.

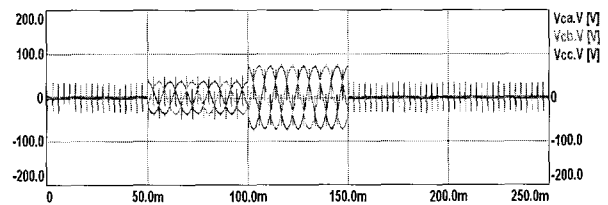
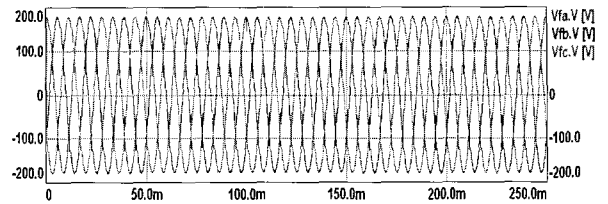
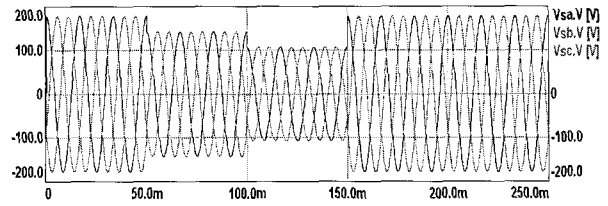
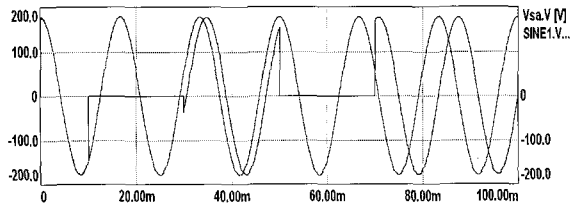


그림 6 전압 보상 모드 시뮬레이션 결과
Fig. 6 Simulation result in voltage compensation mode

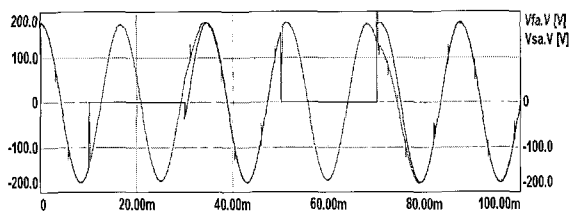
3.2 위상 변위된 전원전압 재인가시 추종 특성

정전이 수십 초를 경과하여 장기화 되면 엔진발전기를 기동하게 되는데, 이 때 인버터 출력전압을 엔진발전기 출력에 동기시켜야 하며, 전원전압이 정상으로 회복되었을 경우, 엔진발전기 출력전압의 위상과 전원전압의 위상은 상이하므로 인버터 출력을 매개로 하여 동기화 시켜야 한다. 이러한 경우를 고려하여 부하전압이 전원전압을 추종하는 특성을 살펴보았다.

그림 7은 전원전압의 위상이 30°와 60° 지연 된다고 가정하였을 경우의 시뮬레이션 파형이다. 10ms에서 순간정전이 발생한 후 30ms에서 전원전압이 복구될 때 원래의 전원전압에 비해 위상이 30° 지연되고, 다시 50ms에서 순간정전이 발생하고 70ms에서 복구되면서 60° 지연된다고 가정하였다. 그림 (a)는 초기의 전원전압과 위상 지연된 전원 전압 파형을 보여주고 있다. 그림 (b)는 위상 지연된 전원 전압과 추종된 부하 전압을 보여주고 있다. 정전구간 동안 UPS 모드로 동작하고 30ms와 70ms에서 정상 전원의 위상이 각각 30°와 60° 지연되어 인가되었으나 그림 (b)에서 보는 바와 같이 1 사이클 이내에 부하전압의 위상을 정상 전원과 일치시키고 있음을 알 수 있다.



(a) 정상전압과 위상지연된 전압
(a) Normal voltage and phase shifted voltage



(b) 위상지연된 전압과 추종된 부하전압
(b) Phase shifted voltage and tracked load voltage

그림 7 전원전압의 위상이 지연되는 경우의 추종특성
Fig. 7 Source voltage tracking characteristic in case of phase delay

4. 실험 결과

그림 1의 시스템에 대한 실험결과는 다음과 같다. 그림 8은 다이내믹 UPS의 입력전압에 30% 전압 Sag가 연속 2회 발생한 경우 입력 선간전압과 출력 선간전압 및 a상 출력전류를 나타낸다. UPS의 입력에 전압 Sag가 발생하여도 전압보상이 이루어져서 출력전압은 정상상태를 유지하고 있음을 알 수 있다. 그림 9는 10 사이클 동안 순간정전이 발생한 경우 다이내믹 UPS의 입력 선간전압, a상 출력전압 및 전류를 나타낸다. 정전보상이 순시적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 그림 10은 PLL 특성을 알아보기 위한 실험 파형이다. 위의 2개 파형은 다이내믹 UPS 입력단 전압이 정전되는 것을 나타내고 세 번째 파형은 a상 전압에 동기된 기준파형이다. 네 번째 파형은 인버터 구동을 위한 변조지수를 나타낸다. 정전이 되면 변조지수는 기준파형에 따라 출력된다. PLL 특성을 확인하기 위하여 정전에서 정상상태로 복귀시 기준전압 파형을 a상에서 b상으로 순간적으로 변화시켰는데, 이러한 순간적 변화에도 불구하고 변조지수는 정확히 기준전압을 추종하고 있음을 알 수 있다.

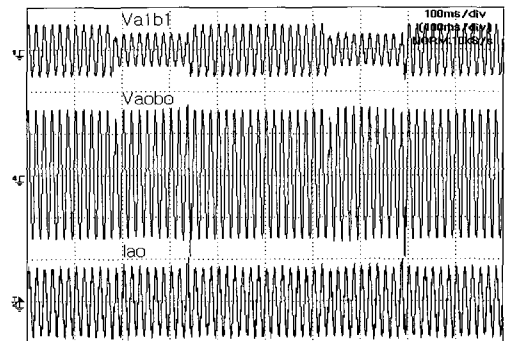
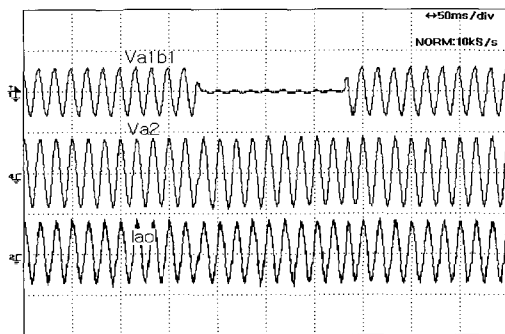
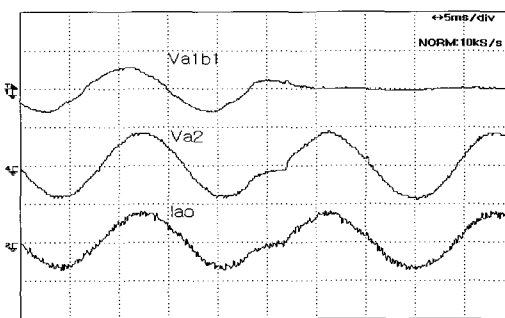


그림 8 30% sag 발생시 입력선간전압(500V/div), 출력 선간전압(200V/div), a상출력전류(20A/div)
Fig. 8 Input voltage (500V/div), output voltage (200V/div), a-phase output current (20A/div) in case of 30% voltage sag



(a) 10사이클 순간정전
(a) 10cycle outage



(b) 순간정전 발생시 확대파형
(b) Zoom-in waveform at the start of an outage

그림 9 순간정전 발생시 입력전압(500V/div), 출력전압(200V/div), 및 전류(20A/div)
Fig. 9 Input voltage (500V/div), Output voltage (200V/div), and current (20A/div) in case of 10 cycles outage

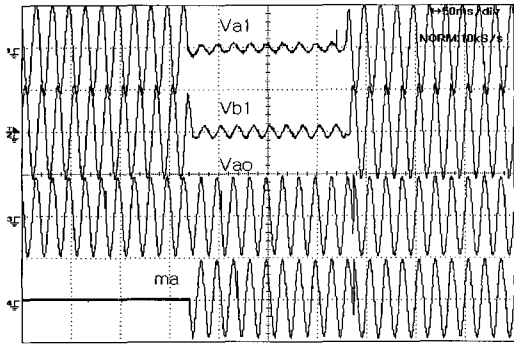


그림 10 PLL 추종특성 : 입력 전원전압, a상 기준전압, a상 변조지수

Fig. 10 PLL tracking characteristic : Input voltage, a-phase reference voltage and modulation index for a-phase

5. 결 론

본 논문에서는 플라이휠 저장에너지를 이용한 다이 나믹 UPS의 전압 보상, 정전 보상, 위상 변위된 전원 전압 재인가시 추종 특성 등에 대해 분석하였다. 정상 시에는 플라이휠에 에너지를 저장하여 두었다가 Sag 와 순간정전 등이 발생하였을 때 이를 보상하여 전력 품질을 향상시키고, 부하에 안정된 전압을 공급할 수 있음을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다. 또한 정전 발생 후 공급 전원이 재인가 될 경우 원래의 공 급 전원에 비해 위상이 임의로 변위되어있다 하더라도 1 사이클 이내에 전원 전압의 위상을 추종할 수 있음 을 확인하였다. 이러한 특성은 다이내믹 UPS에서 전 원전압과 전압보상 또는 UPS 모드에서의 인버터 출력 전압 및 엔진발전기 출력전압 사이의 스위칭시 동기를 맞추는데 필수적이다. 따라서 본 논문에서 다룬 내용 은 플라이휠 저장에너지 뿐 아니라, 슈퍼커패시터나 초전도 저장에너지를 갖는 다이내믹 UPS 등에도 유용 하게 활용될 것으로 기대된다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전 력연구원 주관으로 수행된 과제 (R-2002-B-043)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.

[5] J. G. Nielsen, F. Blaabjerg, and N. Mohan, "Control strategies for dynamic voltage restorer compensating voltage sags with phase jump," *IEEE-APEC*, Vol. 2, pp. 1267-1273, 2001.

[6] S. W. Middlekauff and E. R. Collins, "System and Customer Impact: Considerations for series custom power devices," *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 13, No. 1, pp. 278-282, 1998.

저 자 소 개



이기수(李起守)

1977년 1월 14일생. 2003년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사).



김중원(金重元)

1977년 3월 25일생. 2002년 부경대 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기 공학과 졸업(석사).



노의철(魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수.

1995년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.



전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997~1997년 Univ. of Tennessee 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수.

1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 1996년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.



김인동(金仁東)

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공학). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원.

1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 1996년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.



김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과(공학). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수.

1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 1996년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.



이홍희(李弘熙)

1957년 10월 5일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1994~1995년 Texas A&M 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수.

1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 1996년~현재 부경대 공대 전기제어계측공학부 부교수.