

플라이-휠 에너지를 이용한 무정전 전원장치

황용하, 손인락
(주) 유성테크놀로지스

Flywheel Energy Storage Battery Free UPS

Hwang, Young Ha and Son, In Rock
YuSung Technologies co., ltd.

1. 서 론

지난 10년 동안 전력제품시장에는 상용전원의 장애에 따른 중요 부하의 순시 전력공급을 위한 몇 가지 새로운 에너지 저장기술이 등장하였다. 이 새로운 기술은 기존의 전자 화학 축전지의 대체수단으로서 예를 들어 액체를 응고시키지 않고 빙점 이하로 냉각되는 전자석의 이용과 수압 또는 기체 에너지 저장기술들로 인한 Quick-Start 엔진 등을 포함한 기술이 발전해 왔으나 최근의 전력산업시장에는 가장 오래된 에너지 저장기술 중 하나인 플라이-휠(Flywheel)이 등장하게 되었다.

현대식 플라이-휠은 초고속으로 회전하는 혼합식 휠에서 통상 강철 휠의 회전식 기계까지 여러 형태가 있다. 본 장에서는 현재 고려중인 예비전력에 적용하기 위해 플라이-휠을 적용한 새로운 UPS 시스템의 대략적인 구성, 운전 및 성능에 대하여 설명한다.

2. 구 성

2.1 구성

UPS 시스템은 그림 1에 나타낸 Battery-Free 플라이-휠 에너지저장장치를 이용한 설계방식으로 입력 콘택터, 스테틱 차단 스위치, 라인-인덕터, 출력 콘택터, 플라이-휠/모터/제너레이터, 양방향 플라이-휠 컨버터, 양방향 유틸리티 컨버터, 필터-인덕터 및 플라이-휠 필드 코일 드라이버 등의 주요부품으로 구성되어 있다.

이 시스템은 480V일 때 300KVA 용량을 갖으며, 380V/400V/415V일 때는 250KVA 용량을 갖는다. 완전한 UPS를 구성하기 위해 Automatic Bypass, Grounding Transformer 및 Static Switch Bypass와 Maintenance Bypass와 같은 다양한 장치가 구비되어 있으며, UPS는 단독운전형과 병렬운전형 구별할 수 있다.

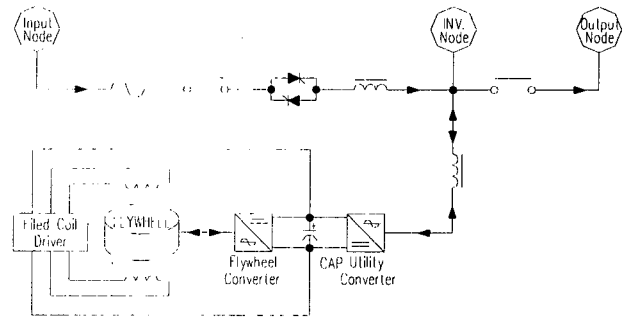


그림 1 플라이-휠을 이용한 무정전 전원장치의 개요도

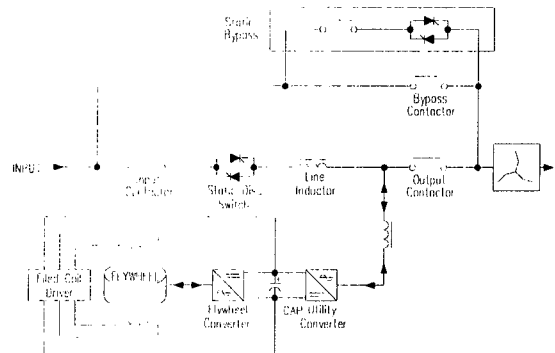


그림 2 250KAV 무정전 전원장치의 개요도

그림 2에 표시된 단독운전형 시스템은 자동 바이패스, 스테틱 스위치 바이패스 및 출력 변압기와 같은 모든 구성이 단독운전용으로 구성되어 있어 병렬 확장이 불가능하며, 병렬 시스템으로 용량을 증가시키기 위해서는 3대 까지 병렬운전이 가능한 구조로 구성된다.

480V급의 시스템 용량은 300KVA, 600KVA 및 900KVA이며, 400V급의 시스템 용량은 250KVA, 500KVA 및 750KVA가 표준용량으로 병렬 구성의 개요도를 그림 3에 표시하였다.

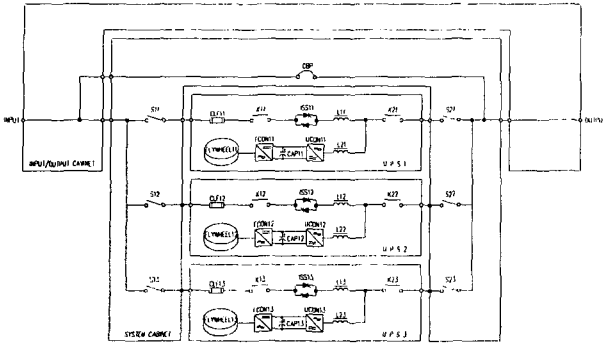


그림 3 UPS 750KVA 구성 개요도

2.2 동작모드

그림 2에서 보여주는 단독운전형 UPS는 다양한 시스템 조작기능을 보유하고 있으며, 그림 3의 병렬운전 시스템에서 모든 UPS는 N+1 운전을 위해 프로그램된 시스템의 예비운전용 UPS를 제외하고 나머지 UPS가 병렬운전된다.

2.2.1 기동

UPS 출력은 전원이 시스템에 공급됨과 동시에 바이패스로 공급되고, UPS는 완전히 자동화된 프로세스를 통해서 기동된다. 키 스위치를 Online 위치로 돌리면 시스템이 동작하기 시작한다. UPS는 모든 제어와 감시 기능이 제대로 동작하는 것과 입력 콘택터(Input Contactor)가 투입되는지를 확인하기 위해 내부적인 점검을 수행한다. 스태틱 차단 스위치(Static Disconnect-Switch)가 동작되면, 도통각(Conduction Angle)은 유틸리티 컨버터(Utility Converter)에 있는 Freewheeling 다이오드의 정류동작을 통하여 유틸리티 컨버터와 플라이-휠 컨버터(Flywheel Converter) 사이에 있는 DC bus 전압이 약 650VDC에 도달할 때 까지 0° 에서 부터 빠르게 벌어진다. DC 전압이 650VDC가 되면 스태틱 차단 스위치는 완전히 도통된다. 이 후에 유틸리티 컨버터의 IGBT가 동작되며, 컨버터는 정류기(Rectifier), 전압조정기(Regulating Voltage Source) 및 능동 필터(Active Harmonic Filter)로서의 기능을 수행한다. IGBT가 동작될 때, DC 전압은 약 800VDC의 정상 동작전압에 이르게 되고, 출력전원은 바이패스 전원에서 UPS 전원으로 절환된다. 이 절환방식은 "Make-Before-Break" 방식으로 출력 콘택터(Output Contactor)가 투입된 후 바이패스가 차단되는 순서로 수행된다.

스태틱 차단 스위치를 구성하고 있는 SCR의 점호(Firing)는 각 상에 설치된 SCR이 반주기 동안만 동작되도록 하며 이것은 실효전력이 상용전원에서 UPS로 공급되도록 한다. 이 SCR의 점호방식은 플라이-휠로 부터 공급되는 전력이 전원 측으로 역류되는 것을 방지하기 위한 것으로 플라이-휠의 모든 에너지가 부하에만 공급

되도록 해준다.

출력전원이 바이패스에서 UPS로 절환된 후에, 플라이-휠 필드(Field)가 여자되어 플라이-휠 베어링의 하중을 최소화시키기 위해 마그네틱 베어링이 자기부상력을 공급한다. 플라이-휠 인버터가 동작하여 플라이-휠을 약 60RPM까지 가속시키기 위해 점차적으로 주파수를 일정한 비율로 증가시킨다. 플라이-휠이 60RPM에 도달하면, 플라이-휠 인버터는 최대 충전전류 및 최대 입력 전류치 이하로 전류를 제한하기 위하여 가속시간을 조절한다.

플라이-휠이 4000RPM에 도달하면, UPS는 모든 기능을 수행하며 정전시 부하를 공급할 수 있는 상태가 된다. 플라이-휠은 완전충전 상태인 7700RPM에 도달할 때까지 가속되며, UPS가 완전히 기동되는데 소요되는 시간은 5분 미만이다.

2.2.2 정상운전

시스템이 기동된 후 플라이-휠은 4000RPM이상으로 가동되며, UPS는 정상운전 상태가 된다. 이 운전 과정에서 UPS는 출력전압, 부하에서 요구되는 무효전류 및 고조파 전류를 공급하며 이와 동시에 UPS 출력전압의 부하 고조파전류를 상쇄시킨다. 그림 4에 나타난 일출력 전류 성분을 분석하면 UPS의 정상 운전을 더욱 쉽게 이해할 수 있다.

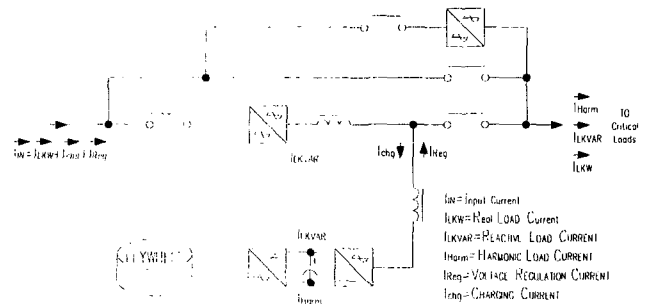


그림 4 : UPS 300KVA의 정상동작시 개요도

입력전류 성분의 하나인 유효전류는 입력 측에서 부하 측으로 공급되는 것으로 유효전류는 공급전압과 동상으로 부하에 유효전력을 공급한다. 전류가 라인-인덕터를 통해 흐를 때, 입력의 유효전류는 전압을 상승시키거나 감소시키기 보다는 라인-인덕터에 인가되어 위상차를 조정한다. 라인-인덕터의 임피던스는 전부하시 입력과 출력의 위상차를 10° 미만으로 제한되도록 설정되며 위상차를 이렇게 적게 유지하는 것은 부하 측의 위상 과도나 이상전압이 발생되지 않은 상태에서 바이패스로 순시 절환될 수 있도록 하기 위한 것이다.

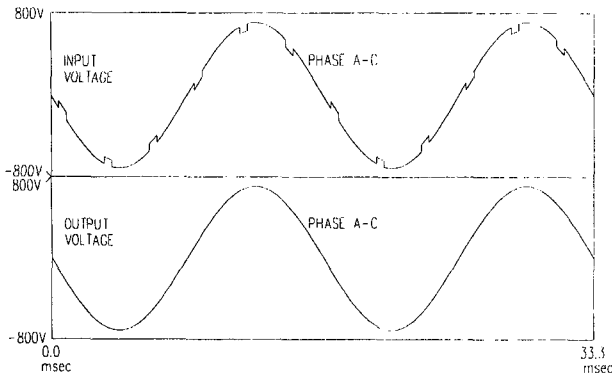


그림 5 UPS 900KVA의 입출력 파형

입력전류의 두 번째 성분은 출력전압을 조정하기 위해 입력과 유틸리티 콘버터 사이를 순환하는 무효전류이다. 라인-인덕터를 통해 흐르는 진상무효전류(전압보다 90° 진상)는 라인-인덕터의 입력측에서 출력측으로 전압을 상승시키며, 지상무효전류는 전압을 강하시킨다. 정격 출력전압을 유지하기 위하여 유틸리티 콘버터를 제어함으로써, 충분한 진상 또는 지상 무효전류가 입력전압과 정격 출력전압의 차이를 만들기 위하여 라인-인덕터를 통해 흐른다. 입력전압은 유틸리티 콘버터가 입력전압의 과도 및 변동 상태에 빠르게 응답할 수 있도록 하기 위하여 입력전압을 매 50us 마다 샘플링한다. 그림 5는 UPS 입출력 간의 전기적 차단 상태를 예를 보여주는 것으로 입력의 노치(Notches) 현상이 출력에는 나타나지 않음을 나타낸다.

입력전류의 마지막 세 번째 성분은 플라이-휠이 완전히 충전되게 하기 위해서 또는 방전 후 플라이-휠을 재충전하기 위하여 사용되는 유효전류이다. 완전충전 상태를 유지하기 위해 사용되는 전력은 2KW 미만이며, 이 전류는 정상운전 시에는 매우 적다. 유틸리티 콘버터는 AC 전압을 정류시켜 플라이-휠 콘버터에 DC 전력을 공급한다. 플라이-휠 콘버터의 IGBT는 플라이-휠의 충전을 유지시키기 위한 모터 전류 펄스를 공급하기 위하여 게이트된다.

부하전류에는 입력전원으로 부터 공급되는 유효전류 이외에 피상전류 및 고조파전류 성분이 포함되어 있으며 피상전류 및 고조파전류는 유틸리티 콘버터에서 공급된다. 이러한 전류 성분은 부하 전류가 아니므로 플라이-휠 에너지는 이러한 전류성분을 만들기 위해 공급되지는 않으며 전류 성분은 입력전원과 부하전원 사이를 순환한다. UPS는 부하에 필요한 고조파 전류를 분석하고 유틸리티 콘버터는 존재하는 고조파 전류에 대하여 저 임피던스 전원을 만들기 위해 IGBT를 동작시킨다. 그러므로, UPS 출력전압 파형에 거의 영향을 미치지 않도록 대부분의 비선형 부하전류는 유틸리티 콘버터에서 공급되며

로 UPS의 입력측으로 역류되는 부하 고조파전류는 거의 없다. 만일, 부하전류의 고조파 성분이 변화하면 변화된 부하에 대한 고조파를 상쇄하기 위하여 유틸리티 콘버터의 게이팅이 변화된다. 그림 6은 UPS의 고조파 상쇄 기능을 나타낸 것이다.

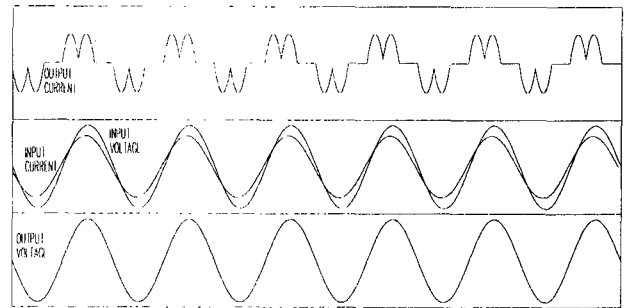


그림 6 고조파 상쇄 파형

그림 6은 50% 이상의 고조파를 갖는 비선형 부하를 UPS가 공급하고 있을 때 입출력 전압과 전류파형을 나타낸 것으로 출력전압 THD는 5%이며, 입력전류 THD는 5% 미만이다. 유틸리티 콘버터가 부하전류의 고조파 및 무효성분을 공급하기 때문에, 부하역률은 입력역률에 거의 영향을 미치지 않는다. 입력측 무효전류의 합은 실제의 RMS 입력전압과 정격 RMS 전압 사이의 차이에 의해 거의 결정된다. 정격전압에서는, 입력역률은 부하역률과는 상관없이 거의 1.0이 되며, 입력전압이 정격전압 이상 또는 이하일 때 UPS의 출력전압을 보정하기 위하여 입력전원과 유틸리티 콘버터 사이에 일정량의 진상 또는 지상전류가 흘러야 한다.

입력역률은 유효전류와 피상전류의 비율이므로, 입력역률은 무효전류와 유효전류 양에 의해 결정된다. 그러므로, 입력역률은 정격입력전압에 대한 전압 편차와 부하전력(kW) 간의 함수로 정의할 수 있다. 경부하시에 입력전압 편차가 동일한 조건에서 총전류는 무효전류 이하가 된다. 따라서, 입력역률은 경부하에서 적어질 수 있지만 저전압에서는 진상으로 고전압에서는 진상으로 변화된다. 이것은 발전기의 전압조절과 무관하므로 통상적인 이중변환(Double Conversion) UPS의 일반적인 특성보다 훨씬 유리한 특성이다. 실제로 입력역률의 변화는 발전기의 전압조절에 유리한 부분으로 작용한다. 진상전류는 저전압일 때 발전기의 전압을 상승시키며, 지상전류는 고전압일 때 발전기 전압이 저감되도록 도와준다. 이에 반하여 통상적인 이중변환 UPS는 입력전압의 고저에 상관없이 경부하에서 매우 큰 진상 입력역률을 갖으며, 예비 디젤전원으로 전환된 후 UPS의 Walk-In 동안, 진상전류는 발전기 출력전압을 허용 가능한 수준 이상으로 전압을 상승시켜 엔진 발전기가 정지된다.

2.2.3 방전 모드

UPS는 전압편차나 프로그램된 주파수 허용범위를 검출하고 스테틱 차단 스위치를 투입하고 입력 콘택터를 차단시킴으로써 입력전원으로부터 UPS를 고속 차단시킨다. 대부분의 경우, UPS는 곧바로 차단되며 차단 시간은 1/2 싸이클 이내이다. 이와 동시에 유틸리티 콘버터는 DC 전원으로 부하전원을 공급하고, 플라이-휠 콘버터는 DC bus를 통해 전력을 유틸리티 콘버터로 전송하기 위해서 IGBT의 점호 위치를 변경한다. UPS는 그림 7에서와 같이 부하 측으로 양질의 전원을 공급한다. 출력전압에는 과도현상이 없으며 입력전압이 복귀된 상태에서 정격부하시의 손실은 3% 미만이다.

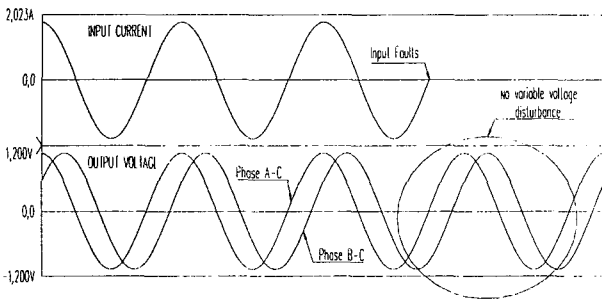


그림 7 100% 부하에서 입력이상 출력전압 파형

UPS는 입력전원 이상을 고속으로 검출하기 위하여 몇 가지 기술을 적용하고 있다. 첫번째 방법은 RMS 전압검출로서 매 다섯번째 싸이클 마다 입력전압의 실효치를 334개의 샘플링으로 계산하여 만일 입력전압의 RMS 값이 UPS내에 설정된 값 이상으로 벗어날 경우, UPS는 입력전원으로부터 차단되어 방전 모드로 동작된다. RMS 전압검출은 입력 전압의 비교적 낮은 변화에 대해 효과적이며 또한, UPS는 입력전압을 매 50us 마다 샘플링함으로써 입력전압 변화를 검출하며, 이전의 RMS 입력전압 측정값과 동일한 RMS값을 갖는 저장된 정현파와 비교하여 샘플링된 값이 저장된 정현파 값을 벗어나면 UPS는 입력전원으로부터 차단되고 방전모드로 동작한다. 과도검출은 매우 고속으로 이루어지며 입력전압의 샘플링에서 플라이-휠을 방전시킬 때까지 전체 지연시간은 약 500us이다. 입력전원 이상을 검출하는 세 번째 방법은 DC 전압 변동으로 어떠한 경우에는 입력전압이 정격상태이지만 전류가 입력전원에서 UPS로 공급되지 않는 경우도 있다. 이러한 경우에는 DC bus 전압은 즉시 감소하게 된다. 미리 설정된 값보다 더 큰 DC 전압의 감소는 UPS를 방전모드로 절환시킨다. 입력 이상을 검출하는 마지막 네번째 방법은 입력 주파수를 정격주파수와 비교하는 것으로 주파수 측정과 비교는 Positive Slope Zero Crossings 주기와 정격주파수의 주기 사이를 매 싸이클마다 비교함으로써 이루어진다. 이 방법은 UPS가 항상 입력전원 이상을 검출하여 출력전압이 영향을 받기 전에 플라이-휠을 방전시키도록 한다.

2.2.4 재충전 모드

입력전압이 설정치로 재조정되었을 때, UPS는 출력과 입력전압을 동기화시켜 입력 콘택터를 투입하고 스테틱 차단 스위치를 동작시킨다. 유틸리티 콘버터는 선형적으로 입력 유효전류를 증가시킴으로써 전력을 플라이-휠로부터 입력전원으로 전력을 흐르게 한다. Ramping Time은 1초부터 15초까지 조정 가능하며, 부하 전력이 완전히 공급되면, 유틸리티 콘버터와 플라이-휠 콘버터는 플라이-휠을 재충전시키기 시작하고 정상운전으로 되 돌아온다. 재충전 전력은 33KW에서 70KW사이로 조정 가능하다. 최대 재충전 전력은 UPS 입력 전류를 85Amp까지 상승시키며, 재충전은 정상 운전에서의 완전충전을 유지하는 것과 비슷한 방법으로 유틸리티 콘버터와 플라이-휠 콘버터를 제어함으로써 수행되지만, IGBT 케이팅 포인트는 플라이-휠의 전류를 증가시키기 위하여 변화한다. 입력전원과 Walk-In 간의 전형적인 재연결은 그림 8에 나타나 있다. Walk-In과 재충전 비율을 포함한 두 개의 변수는 설정 가능하며 재충전 비율은 외부에서 공급되는 무전압 점점의 동작에 의해 선택된다.

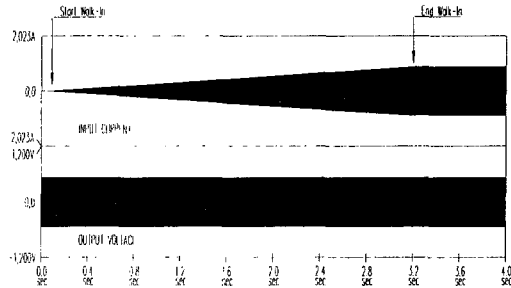


그림 8 100% 부하에서 입력전원 복귀시 파형

2.3 병렬 UPS

병렬 UPS는 그림 3에 나타난 것과 같이 병렬로 운전되는 UPS를 말하며, 각 UPS에는 완벽한 병렬 제어부가 설치되어 있고, 각 UPS 간 통신들은 Redundant Serial Bus를 통해서 연결된다. 정상운전 시, 유효전력은 단순히 모든 라인-인덕터를 동일하게 설치함으로써 UPS 간에 분배된다. 무효전류는 각 UPS에 있는 유틸리티 콘버터의 AC 전류 검출과 모든 UPS의 전류를 평균치에 맞추어 분배된다. UPS 간 최대 전류 불평형은 5% 미만으로 제한된다.

방전 모드에서 모든 유틸리티 콘버터의 위상각과 진폭은 평균값으로 맞춰지며, 이것은 UPS 간 무효전류 및 유효전류를 평형화시켜 출력 주파수가 일정하게 유지되도록 한다.

2.4 N+1 Redundancy UPS

모든 병렬시스템에는 예비 UPS를 설치할 수 있으며 (N+1) 병렬 시스템과 (N+1) 용량을 갖는 병렬 시스템

참 고 문 헌

- [1] Alain Chabod, Quality Power for the Semiconductor Industry, Power Deregulation, FLUX No. 207, May/June 2000
- [2] Bradley S. Walter, High Reliability Battery-Free Power Quality Solution for Large Internet Data Centers, Power Quality North America, June, 2001
- [3] Ruter Elish, Ilef Jonsson, and Kjell Lundqvist, Modern and Future Telecom Networks: Discussion of Demands on Batteries and Battery Demands for Safe Operation, INTELEC 96, IEEE

간에는 하드웨어에 있어서 차이가 없다. 예를 들면, 300KVA N+1 UPS와 600KVA UPS는 동일한 하드웨어를 가지고 있다. N+1 구성에서 UPS 중 하나는 다른 UPS와 다르게 운전된다. 만일, N+1 시스템의 모든 UPS가 동일하게 운전된다면, UPS는 감소된 부하에서 운전되는 한 단계 높은 용량의 병렬 UPS 모듈처럼 동작된다. 무효전류는 부하 전압을 조정하기 위해 모든 N+1 라인-인덕터를 통해 공급되어야 하며 추가된 라인-인덕터를 통해 흐르는 추가 전류는 효율, 입력전류 및 입력역률에 영향을 미친다. 이러한 영향을 방지하기 위해서, 예비운전용 UPS는 스택 차단 스위치를 차단시킨 상태로 운전된다. 이것은 어떤 전류도 예비운전용 UPS의 라인-인덕터를 통해서 흐르지 않도록 하기 위한 것으로, 어떠한 추가 전류도 이 라인-인덕터를 통한 전압 조정을 위해 필요하지 않다.

예비운전용 플라이-휠은 스택 차단 스위치와 라인-인덕터를 통하지 않고 출력으로부터 전원을 공급받아 충전된다. 또한, 예비운전용 플라이-휠은 다른 UPS의 플라이-휠과 마찬가지로 방전되며 이 때, 각 UPS는 부하를 동일하게 분담하므로 방전시간이 확장된다.

예비용 UPS의 유틸리티 컨버터는 다른 UPS와 무효전류를 분담하며 다른 UPS에 있는 라인-인덕터와 부하측의 무효전류 및 고조파 전류를 통해 전압 조정 전류를 공급한다. 이것은 다른 UPS로부터 공급되는 전류의 양을 감소시키며 결과적으로, 예비운전용 UPS의 모든 것들은 스택 차단 스위치가 차단된 상태로 있는 것을 제외하고는 다른 UPS와 동일하게 운전된다.

만약 어떤 UPS에 이상이 발생되면 예비운전용 UPS는 500us 내에 스택 차단 스위치를 동작시켜 부하를 분담하게 된다. 예비운전용 UPS가 항상 운전 가능한 상태로 되기 위해 미리 설정된 주기로 각 UPS가 돌아가면서 예비운전용 UPS의 기능을 수행한다.

예비운전 상태의 이동은 예비운전용 UPS의 스택 차단 스위치를 동작시키고 다른 UPS의 운전상태를 감시한 후 이상이 없을 때 정해진 UPS를 예비운전용으로 동작시키는 안전한 방법으로 수행된다.

3. 결 론

Batter-free UPS는 고효율의 라인-인덕티브 기술을 이용한 고성능 UPS로서 이 UPS는 통상적인 부하뿐만이 아니라 고도의 비선형 부하를 위한 우수한 출력 전압 품질을 보유하고 있으며, 이와 동시에 입력역률 고조파를 감쇄시켜 입력필터의 필요성을 배제하였고 입력전원 전압에 따른 입력역률을 개선하여 엔진 발전기에 손쉽게 적용가능하다.

UPS는 현지의 용이한 설치와 서비스 및 용량 확장시 UPS의 설치비용을 절감시키기 위하여 모듈 방식으로 구성된다