

## UPS용 배터리를 대체하는 열과 압축공기를 이용한 직류발전장치

황 용 하  
(주)아세아이엔티

### Thermal And Compressed Air Storage (T A C A S)

Hwang yong Ha  
ASEA Electric & Technology Co., Ltd.

#### 1. 서 론

본 개발품은 현재 확보되어 있는 3가지의 이미 검증된 에너지저장 기술을 조합하여 화학반응에 의한 에너지 저장방식인 축전지를 대체하기 위한 새로운 시스템으로 개발하였다.

#### 2. 새로운 에너지 저장 기술의 필요성

한 세기 이상 전화 사업은 전화국에 통신장비용 전원 장치와 연축전지를 설치하여 비교적 성공적으로 운영하였다. 연축전지는 조건에 맞는 환경과 2V/Cell 축전지 24개를 직렬로 2조를 구성하여 각 축전지군을 교대로 철거한 유지보수와 충, 방전조건을 잘 지켜주면 신뢰성을 갖고 운영할 수 있다.

그러나 이런 환경조건이 만족되지 않으면 신뢰도는 저하 될 것이다. 예를 들면, 통신관련 장비가 240개를 직렬로 연결한 축전지(전화국 통신장비용의 10배의 축전지 사용)를 사용하는 Data Center의 전원장치는 고장위험이 훨씬 증가한다.

Data Center에서 사용하는 UPS용 축전지는 보통 설치장소나 비용문제로 2조씩 설치하지 않으며 충, 방전 횟수가 빈번하고 급속한 충, 방전을 필요로 하기 때문에 수명이 짧아지고 직렬로 연결되는 수량이 많아 신뢰성이 낮아지며 연축전지는 공해물질인 납으로 구성되어 납을 재활용하는 문제도 있다.

#### 2-1. 플라이 휠 : 첫 번째 대안

1990년대 후반 플라이 휠 에너지저장 시스템은 UPS의 축전지 대체용으로 상용화가 실현되었다.

이 시스템은 튼튼하고, 신뢰성이 높고, 환경친화적이며 전력밀도가 높은 것이 검증되었다.

플라이휠은 비상용발전기 또는 상용교류 입력으로 절제 되기에 충분한 시간 동안 UPS가 연속 동작을 하는 Bridging Energy Source로 성공적으로 사용되고 있다.

플라이휠은 축전지수명을 짧게 하는 단 시간 방전과 부하 급변 시 축전지의 방전을 방지하여 축전지의 수명을 연장시키는 용도로도 사용된다.

그러나 플라이휠은 Data Center나 통신용으로 적용할 때

는 축전지에 비해 상대적으로 Back Up시간이 짧아 축전지와 혼용하여 양쪽의 장점을 살릴 수 있도록 구성하면 대단히 성공적으로 운영할 수 있을 것이며 정전 시 중요한 부하를 비상발전기로 안전하게 무순단 절체를 우선으로 하는 반도체회사 등 제조라인이나 방송국 등과 같은 분야에서는 아주 바람직한 성과를 얻을 수 있다.

이번에 개발된 제품은 종전과 다른 새로운 방법으로 접근했다. 축전지를 대체하는 기술은 안전해야 하고 신뢰성이 있어야 하고 독성이 없고 콤팩트(에너지 밀도가 높음)해야 한다는 것을 전제로 시작했다.

또한 설치비용이 저렴하고 운영비용(장수명, 유지보수 비용)이 저렴하도록 하였다.

압축 공기저장은 안전하고, 독성이 없고, 높은 압력에서 에너지 밀도가 높다.

효율은 압축하는 동안에는 열을 저하시키고 공기가 팽창하는 동안에는 이 열의 일부가 재생된다. 큰 압력을 받는 용기에 재충전 할 때는 효율이 좋지 않다.

이에 비해 열 저장방식은 연축전지보다 에너지밀도가 3배 이상 높다

열에너지를 전기로 직접 변환하는 것은 아직은 시기상조이다.

온도변화에 민감한 물질이나 상태의 변화에 따라 어딘가 존재하지만 아직은 나타나지 않은 새로운 물질에 찾아 접근하면 열에너지를 전기로 직접변환 하는 것이 가까운 기간 내에 실현될 것이다.

Table 1은 연축전지, 플라이 휠, 압축공기, 열 에너지저장을 개별적으로 적용할 때 장점과 단점을 보여준다.

#### CAES기술을 응용

미국의 공공전기회사들은 압축공기 에너지저장(Compressed Air Energy Storage: CAES)이라고 부르는 전력저장 기술을 연구하였다.

저 비용으로 전력Peak를 제어하는 용도로 압축공기를 지하 동굴이나 대수층에 저장하였다가 전력Peak가 발생하면 압축공기를 연소실을 통해 방출시켜 팽창터빈을 운전할 수 있는 충분한 열에너지로 만들어 터빈을 운전한다.

2004년 중반까지 2개의 CAES플랜트가 건설되어 운전되고 있다.

Table 1. 에너지 저장 기술 비교

	에너지저장기술			
	연축전지	플라이휠	압축공기	열저장
전력밀도	Good	Very Good	Fair	Excellent
에너지밀도	Very Good	Fair	Good	Excellent
충.방전수명	Fair	Excellent	Very Good	Very Good
크 기	Good	Excellent	Fair	Excellent
동작시간	Very Good	Fair	Good	Very Good
충전시간	Good	Excellent	Fair	Very Good
응답특성	Very Good	Excellent	Poor	Poor
유지보수 비용	Fair	Very Good	Good	Very Good
주위온도	20-25℃	0-40℃	0-40℃	0-40℃
수명 (UPS용)	3-12년*	20년	20년	20년
환경	유독	친환경	친환경	친환경
설치비용	1.0-1.4	1.4	5.0	5.0

그림1은 System전체공기흐름과 주요구성품의 예이다.

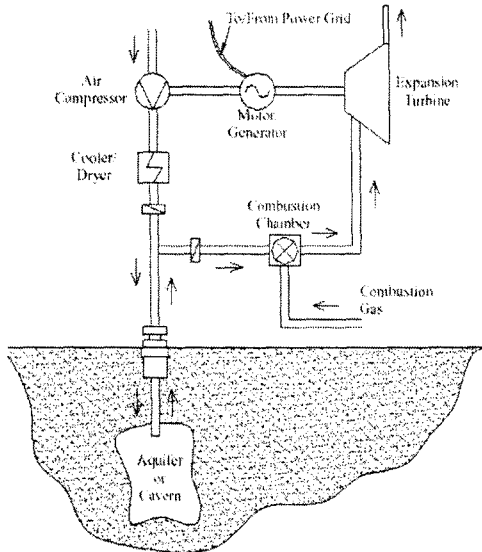


그림1. 압축공기에너지저장(CAES)  
Compressed Air Energy Storage

CAES기술의 절대적인 한계점은 압축공기를 저장할 수 있는 폐광이나 대수 층 등이 있어야 한다는 것이다.

더군다나 이 System은 System자체에서 모든 동작이 이루어지지 않고 연소Chamber에 천연 Gas를 파이프라인을 통해 공급하여야 한다. 이러저러한 이유로 CAES는 발전 규모가 100MW이상에서 검토할 수 있다.

### 3. 에너지 저장 기술의 조합

System자체에서 모든 동작이 이루어지는 에너지 저장시스템을 만들기 위해 플라이휠과 CAES기술을 함께 채택하여 개발하였다. 작은 플라이휠이 부하급변이나 순간 정전 시 즉시 전력을 공급하는 동안 장시간 정전에 대비하여 압축공기와 열에너지는 팽창터빈을 가동시킨다.

#### 3-1. 압축공기 시스템(Compressed-Air System)

TACAS는 일반적인 Gas Cylinder나 압축용기에 압축공기를 저장하기로 하고 시작했다.

시스템이 목표로 하는 성능을 만족시키기 위해서는 4500 PSI (Pound per Square Inch) 이상의 높은 압력의 압축공기를 저장할 필요가 있다.

이 정도의 압력은 호흡장치가 내장된 일반 Compressor 나 잠수탱크에 채우는 압력 정도이다.

(Gas 실린더는 일반적으로 6000 PSI 정도이다.)

#### 3-2. 열저장 유닛(Thermal Storage Unit : TSU)

TACAS의 핵심은 가연성Gas를 외부에서 공급할 필요 없이 자체적으로 저장하는 Thermal Storage Unit(TSU)에 있다.

나중에 더 논의하겠지만, 압축공기에 열을 전달하는 용도로 스테인리스 파이프를 사용한다.

파이프에 온도가 704℃가 되도록 표준 전기저항 히터로 설계했다.

#### 플라이 휠 에너지저장(Flywheel Energy Storage)

상용화되고 있는 플라이 휠 장치는 진공 펌프, 휠을 띄우기 위한 마그네틱 베어링, 플라이휠과 모터 제너레이터의 일체화 등 성능향상을 위한 기술이 적용된 다양한 형태가 있다.

그러나 새로운 하이브리드 제품은 경제성과 제작가능성을 최우선으로 했다. 그 결과 개발된 플라이휠은 진공 펌프, 마그네틱 베어링, 카본 파이버 혼합물, 플라이휠과 모터 제너레이터의 일체화 등을 채택하지 않고 공기 중에서 회전하면서 최대 부하에서 3초 이상 back-up전력을 공급하도록 설계되었다.

#### 3-3. 팽창터빈(Expansion Turbine)

가열된 압축공기는 간단한 1 Stage 팽창터빈을 돌린다. 전통적인 팽창터빈은 3 Stage 즉 인입 되는 공기를 압축시키기 위한 압축Stage, 연료와 압축공기가 연소실에 주입되어 점화되는 점화Stage, 팽창하는 배출 Gas가 에진 축과 연결된 터빈 Blade를 구동시키는 팽창 Stage가 있다.

새로운 하이브리드 제품은 공기 실린더 속에 압축공기를 저장하고 TSU 내부에서 가열하며, 터빈의 3번째 Stage (팽창Stage)만 필요하다. 이 제품은 대단히 간단하고 소형이 된다.

터빈 Blade의 관성이 적기 때문에 최대 동작속도인 70,000rpm까지 도달하는 시간은 2초 이내이다.

완제품 TACAS 시스템(The Complete TACAS System)그림 2는 TACAS의 Block Diagram이다.

TSU는 최대동작온도를 유지하고 압축공기실린더는 만충전상태이다. 플라이휠 시스템은 연속적으로 UPS의 DC bus와 on-line되며 부하급변과 순간정전(3초 이내)시 전력을 공급한다.

TACAS가 장시간 정전을 검출하면 TACAS는 제어 밸브를 동작시켜 압축공기를 TSU를 통해 팽창터빈으로 보낸다. 터빈과 직 결합된 발전기는 약1초 정도면 동작속도에 도달하고 부하를 감당하게 된다.

플라이휠 시스템은 UPS와 타 전력 사이에서 확실한 완충작용을 하기 위해 계속해서 DC bus 에 연결되어 있다. 플라이휠은 UPS출력에 부하를 투입 시 전력을 공급하고 부하를 제거 시 에너지를 흡수하는 역할도 한다.

TACAS는 터빈/발전기출력의 일부분을 플라이휠 시스템으로 공급하여 미리 정해진 회전속도까지 상승시켜준다. 정상적인 입력전원이 UPS에 공급될 때 TACAS는 자체적으로 재충전된다.

플라이휠은 수초 내에 최고속도로 회복된다. TSU 히터 스위치는 ON되고 최대온도로 다시 복귀된다. 마찬가지로 에어 콤프레서는 실린더에 공기를 재충전한다.

완전히 회복되어 다음정전에 대비하는데 필요한 총소요시간은 방전시간에 비례한다.

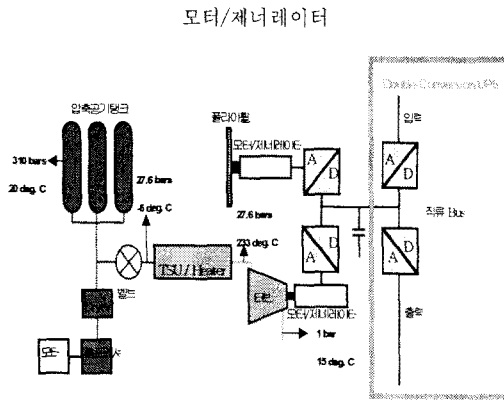


그림2. Thermal And Compressed Air Storage(TACAS) Diagram

Table 2.는 본 시스템을 연속전지와 플라이휠과 비교한 것이다.

표에서 볼 수 있듯이 TACAS는 타 기술의 한계점을 보완할 수 있는 완전히 다른 강점을 갖고 있다.

플라이휠은 응답특성이 최상이며 급격한 부하 변동특성이 대단히 우수하다.

열 및 압축공기와 함께 결합되어 플라이휠의 부족한 점인 단 시간Back-up을 장시간Back-up이 가능하게 하였고 플라이휠의 빠른 재충전시간은 Air 탱크에 Air가 재충전되는 시간을 보상할 수 있다. 3가지 기술은 모두 환경친화적인 기술이며 정상적인 유지 보수를 하면 20년간 사용할 수 있다. 놀라운 것은 시스템에 저장된 에너지의 대부분은 TSU내부에 있다는 것이다. 결합된 플라이휠과 압축공기는 저장된 에너지의 반 이하를 공급하며 압축공기는 팽창터빈으로 열에너지를 운반하는 일차 매개체이다. 그

러나 TACAS의 가장 주목할 만한 사항은 에너지 저장기술 3가지 모두가 충분히 입증되고 검증된 기술이며 단지 참신한 것은 이런 기술들을 이용하여 실용적인 제품으로 상용화 했다는 것이다.

Table 2.

	에너지저장기술		
	연속전지	플라이휠	TACAS
Power Density	Good	Very Good	Good
Energy Density	Very Good	Fair	Very Good
Cycle Life	Fair	Excellent	Excellent
Footprint	Good	Excellent	Good
Runtime	Very Good	Fair	Very Good
Recharge Time	Good	Excellent	Good
Dynamic Response	Very Good	Excellent	Excellent
Maintenance Cost	Fair	Very Good	Very Good
Ambient Temp	20-25°C	0-40°C	0-40°C
Life in UPS app	3-12년*	20년	20년
Environmental	유독	친화적	친화적
Installed Cost	1.0-1.4	1.4	1.4

\*3 5년은 밀폐 형 연속전지, 8 12년은 전해액 축전지

### 3-4. 실용에 적합한 개념

TACAS를 시험하는 개념은 비교적 간단하다.

개발과정에서 최초의 시험 장비를 만들기 위해서는 표준압축공기 저장용기, 에어 콤프레샤, 자동 제어되는 에어밸브, 터빈발전기 등 재고가 있어 당장 구할 수 있는 제품을 찾았다.

힘들었던 부분은 구매가 가능한 최고 품을 구매하여 무에서 새롭게 설계된 완제품의 성능을 예측하기 위해서는 아주 정확한 모델을 찾아야 한다.

최초 설계품의 가장 큰일의 하나는 크기, 모양, TSU의 내부배치 들이고, 또 다른 과제는 적절한 가격의 플라이휠 시스템을 개발하는 것인데 개발품의 10년 후의 성능은 초기 비용의 중요성 보다 더 중요하다.

설계가 끝나고 시제품이 조립되었을 때 에어탱크와 콤프레샤를 제외하고는 눈에 띄는 것이 없었다.

TSU는 광택이 나는 금속 실린더였고 터빈은 외함이 없는 옥내용이었다. 그사이에는 파이프와 와이어 등 여러 가지가 있었다.

놀라운 것은 설계 시 예측했던 대로 동작되었다. 시제품은 부하 20Kw로 15분간 공급할 수 있었다.

### 3-5. 제품의 사양

다음은 시장에서 요구하는 자료(MRD: Marketing Require

ments Document) 이다.

TACAS의 일반적인 사양 :

- 입, 출력 DC전압 : 380V-540VDC (최대 부하 시)  
(대부분의 UPS 제조회사에서 채택하고 있는 3상UPS의 표준 DC전압에 맞는 일반 배터리와 동일하게 동작).
- 정격용량 : 85kVA / 80kW  
(용량증가는 다수 대 병렬운전으로 가능하고 동작이 간단하며, DC차단 스위치를 투입하는 것 외에 다른 운전조작이 필요치 않다).
- 최대 Back-up시간 : 최대 부하 시 15분
- 주위 온도조건 : 0-40°C
- 기대 수명 : 20년
- 연속전지보다 신뢰도는 높고 현재의 상태와 앞으로 나타날 고장을 사전 예고하는 경보표시.
- 소음 : 70dBA이하
- 사회적으로 요구하는 완전히 재생 가능하고 유독하지 않은 소재로 제작.
- 단두개의 캐비닛에 모듈 형태로 설계.

(기본 캐비닛에는 플라이 휠, 콤프레사, TSU, 제어 회로, 전력 변환기 및 터빈 발전기가 장착되고 또 하나의 캐비닛에는 압축공기 실린더와 기타 기구 물들이 장착된다).

동작시간을 연장하거나 효과적으로 빨리 재충전하기 위해서는 압축공기 실린더 캐비닛을 추가하면 된다.

설계 과제 중 하나는 TACAS를 가능한 한 작게 만드는 것이며 특히 표준 TACAS유 니트의 크기는 축전지 캐비닛 정도로 만드는 것인데 이것이 불가능할지도 몰랐지만 최상의 배열로 극복했다.

### 3-6. 제품의 가격

개발팀의 목표는 TACAS의 도입비용이 축전지 도입비용보다 경쟁력이 있게 만드는 것이었다.

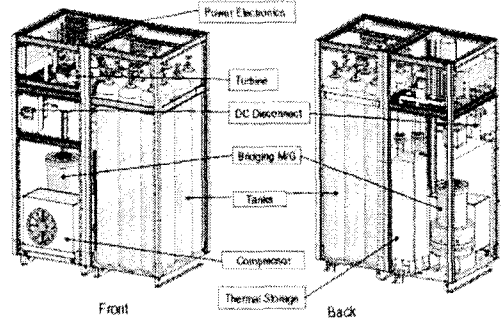
게다가 TACAS시스템은 수명이 길고 유지보수비용이 저렴하여 축전지 보다 운용비용이 낮아진다.

### 3-7. 팽창 터빈의 최적화

TACAS용 터빈은 다른 터빈과는 달리 팽창터빈의 배출구에 연소 gas가 없는 독특한 방식을 선택했다. 배출구에는 깨끗한 공기가 배출되며 약간의 소음이 난다.

운 좋게 소음은 쉽게 잡을 수 있었다. 문제는 배출 공기자체의 처리였다. 터빈은 배출공기 온도가 실내온도와 비슷한 정도가 되도록 공기통로에서 열에너지를 제거해야 한다.

1개의 밸브를 통해 바이패스에어를 증감하여 배출공기의 온도를 자연적으로 조절할 수 있다. 열이 가해지지 않은 공기는 대단히 차갑기 때문에 바이패스 에어를 배출 에어에 조금만 섞어도 배출되는 공기는 12.8°C가 되며 이온도는 Data Center 마룻바닥 온도와 같다.



TACAS 내부 부품 배치도

### 3-8. 콤프레사

앞에서 언급한 것처럼 콤프레사는 전 세계적으로 넓이 쓰이는 4500 PSI 이며 중요한 것은 제품의 용도에 맞고 성능이 좋은 콤프레사를 적절히 선택하는 것이다.

개발팀은 유지보수가 거의 필요 없고 수명이 긴 것을 찾기 위해 몇 개의 콤프레사의 내구성 시험을 하였다. 내구성이 가장 우수한 표준 콤프레사 한 가지를 선택했다. 선택 판단의 기준은 신뢰성과 모양이다. 가격은 대상 품종에서 가장 좋은 제품을 선정하였다.

### 3-9. 시스템 컨트롤

3가지의 다른 에너지를 관리하는 것이 쉽지 않았다.

문제는 압축공기와 열에너지의 응답속도가 다르다는 것이다. UPS 입력 전력이 정상적으로 동작할 때 플라이 휠은 최대속도를 유지하고 단 시간 정전에 대비한다. 압축공기 탱크에는 상시 최대용량으로 채워져 있고 TSU는 상시 운전온도를 유지하고 있다.

DC전압이 떨어지면 UPS는 입력정전을 표시하고 제어 장치는 언제 에어 밸브를 작동하여 방출시킬 것인가를 결정하기 위해 플라이휠의 회전속도를 감시한다.

에어탱크의 에어가 TSU를 통해 방출되는 동안 시스템 제어장치는 플라이 휠 회전에너지로 재 저장하도록 제어한다. 플라이휠은 에어밸브가 적절하게 응답하는데 걸리는 시간 동안 부하가 급격히 투입될 때 에너지를 공급하고 부하가 빠질 때 잉여 에너지를 흡수할 수 있어야 한다. 다행히 우리 설계 팀은 플라이 휠 양방향동작과 공기 흐름을 관리하는 제어경험이 있었다. 제어방법은 컴퓨터 기술을 이용하여 정교하고 쉽게 관리하도록 하였다.

## 4. 결 론

본 개발품은 지금까지 사용해오던 전력저장방식인 축전지를 대체할 수 있도록 축전지의 단점은 제거하고 장시간 방전이 가능하다는 축전지의 가장 큰 장점을 만족하도록 압축공기 탱크의 수량으로 따라 방전시간을 조절할 수 있도록 개발된 무공해 환경친화적인 전력저장장치를 개발하여 상용화시킨 것이다.