

정압식 압축공기저장(CAES) 발전 시스템 에너지 분석

김영민[†] · 이선엽 · 이장희

한국기계연구원 그린동력연구실

(2010년 10월 20일 접수, 2011년 7월 22일 수정, 2011년 7월 29일 채택)

Energy Analysis of Constant-Pressure Compressed Air Energy Storage (CAES) Generation System

Young Min Kim[†], Sun Youp Lee and Jang Hee Lee

Department of Engine Research, Korea Institute of Machinery & Materials

(Received 20 October 2010, Revised 22 July 2011, Accepted 29 July 2011)

요 약

압축공기저장(CAES) 발전은 가스터빈에 필요한 압축공기를 야간이나 비첨두 시간에 저렴한 전기로 미리 압축해서 저장하였다가 주간에 활용하는 것으로 전력 저장과 발전의 하이브리드 기술이라고 할 수 있다. 그러나 기존 압축공기저장 발전의 경우 심야에 압축공기를 일정부피의 압축공기 저장조에 충전하게 되면 저장조내의 압력은 점점 증가하게 되고, 반대로 주간에 발전을 위해 압축공기를 방출하게 되면 저장조내의 압력은 감소하게 된다. 이와 같이 운전 압력비 조건이 넓은 범위로 변화하여 설계 압력비에서 벗어나게 되는 것은 압축 및 팽창효율이 크게 감소하게 되는 원인이 된다. 본 논문에서는 이러한 기존의 변압식 압축공기저장 발전 방식의 문제점을 해결하기 위해 새로운 방식의 정압식 압축공기저장 발전 방식을 제시하고 있으며, 엑서지 개념을 포함한 에너지 분석을 통해 에너지 밀도 증가와 효율 향상 효과를 예측하였다. 새로운 방식의 정압식 압축공기 저장 발전 방식은 정압식 압축공기 저장 발전과 공압식 양수발전의 하이브리드 개념으로 기존 변압식 압축공기저장 발전 방식에 비해 정압 운전에 의한 효율향상과 에너지 밀도 증가로 압축공기 저장조의 크기를 50%이상 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

주요어 : 압축공기저장(CAES) 발전, 정압식 CAES, 에너지 밀도, 엑서지

Abstract — Compressed Air Energy Storage (CAES) is a combination of energy storage and generation by storing compressed air using off-peak power for generation at times of peak demand. In general, both charging and discharging of high-pressure vessel are unsteady processes, where the pressure is varying. These varying conditions result in low efficiencies of compression and expansion. In this paper, a new constant-pressure CAES system to overcome the current problem is proposed. An energy analysis of the system based on the concept of exergy was performed to evaluate the energy density and efficiency of the system in comparison with the conventional CAES system. The new constant-pressure CAES system combined with pumped hydro storage requires the smaller cavern with only half of the storage volume for variable-pressure CAES and has a higher efficiency of system.

Key words : Compressed Air Energy Storage (CAES), Constant-pressure CAES, Energy density, Exergy

1. 서 론

[†]To whom corresponding should be addressed.
ECO Machinery Division, KIMM 156, Gajungbukno Yuseong-gu,
Daejeon, 305-343, Korea
Tel : 042-868-7377; E-mail : ymkim@kimm.re.kr

전력저장의 목적은 크게 전력 부하관리와 고품질의 전력공급 두 가지로 나뉘어진다. 부하관리를 위한

전력저장의 경우, 전력소비 패턴이 특정 시간대에 집중되어 있기 때문에 부하조절이 어려운 기저 공급력(원자력, 석탄화력 등)에 의한 심야의 잉여전력을 저장해서 발전단가가 높은 주간의 첨두부하를 대체한다면 큰 경제적 이익과 에너지 절감효과를 가져올 수 있다. 또한 향후 보급이 더욱 활성화 될 것으로 예상되는 풍력, 태양광 등 신재생 에너지는 전력소비 패턴에 맞게 발전이 이루어지지 않고 간헐적이기 때문에 발전전력을 저장해서 수요패턴에 맞게 공급해야만 효율적으로 이용할 수 있어 전력저장의 필요성은 더욱 증가하고 있다 [1].

전력저장의 방법으로는 축전지(Battery), 축전기(Capacitor), 초전도 저장(SMES) 등 전력의 형태로 저장하는 기술 외에 위치에너지로 변환시켜 저장하는 양수발전, 운동에너지로 저장하는 플라이휠, 압력에너지로 변환하는 압축공기저장(CAES: Compressed Air Energy Storage) 등이 있다. 여러 가지 전력저장 기술 중에서 슈퍼커패시터, 플라이휠, 초전도 저장(SMES) 기술은 고출력의 전기를 짧은 시간동안 공급함으로써 순간 전압저하 보상용 등 고품질의 전력공급용으로 기술개발이 진행되고 있으며, 현재로서 대용량 전력저장이 가능한 상용화 기술은 양수발전과 압축공기저장(CAES) 발전 뿐이라고 할 수 있다. 대용량 전력저장에 대한 필요성은 더욱 더 증가하고 있지만 양수발전의 경우 지형적인 제약과 환경적 문제로 새로운 발전소 건설이 어려워지고 있어 최근 전 세계적으로 압축공기저장 발전에 대한 관심이 높아지고 있으며 다양한 프로젝트들이 진행되고 있다 [1].

압축공기저장(CAES) 발전은 가스터빈에 필요한 압축공기를 야간이나 비점두 시간에 저렴한 전기로 미리 압축해서 저장하였다가 주간에 활용하는 것으로 전력저장과 발전의 하이브리드 기술이라고 할 수 있다. CAES 발전은 압축과 팽창을 시간적으로 분리함으로써 보통 가스터빈과 비교하여 2~3배의 발전출력을 얻음으로서 설비의 발전단가를 대폭적으로 저감할 수 있지만, 추가비용으로 압축공기의 저장조 건설 비용이 큰 비율을 차지하기 때문에 CAES 발전의 경제성은 압축공기 저장조를 어떻게 경제적으로 건설할 수 있는가에 달려있다고 할 수 있다. 지금까지 100 MW급 이상의 대규모 CAES 발전 플랜트의 경우 대부분 자연적으로 기밀성이 확보되는 지하 암염층, 배사 대수층 등을 이용하고 있으며, 이외에도 폐광이나 폐터널 등을 이용하는 방법도 있다. 최근에는 입지조건이 매

우 까다롭고 제한적인 대규모 CAES 발전과는 달리 수요지에 가깝게 인공의 압축공기 저장조를 건설한 소규모 분산형 Micro-CAES 발전에 대한 관심도 높아지고 있다. Micro-CAES 발전의 경우 압축과정에서 발생하는 많은 열을 축열하여 난방열로 활용할 수 있기 때문에 열병합 발전과 같이 에너지 이용효율을 크게 향상시킬 수 있는 장점이 있지만, 스틸 파이프 또는 압력 용기 구조를 가진 인공의 압축공기 저장조가 필요하므로 저장조의 비용은 상대적으로 증가하게 된다 [1].

압축공기저장 발전이 일반적인 가스터빈과 다른 점은 압축공기저장 공간을 줄이기 위해 압력비가 50이상으로 높으며, 심야에 압축공기를 일정부피의 압축공기 저장조에 충전하게 되면 저장조내의 압력은 점점 증가하게 되고 반대로 주간에 발전을 위해 압축공기를 방출하게 되면 저장조내의 압력은 감소하게 된다는 점이다. 이와 같이 운전 압력비 조건이 넓은 범위로 변화하여 설계 압력비에서 벗어나게 되는 것은 압축 및 팽창효율이 크게 감소하게 되는 원인이 된다 [2]. 따라서 일반적으로는 압축공기 저장조의 부피를 크게 하여 압축공기를 충전하고 방출할 때 압력 변동폭이 일정범위로 유지되도록 하고 있으며, 이는 압축공기 저장조 건설의 비용을 증가시키는 원인이 되고 있다. 본 논문에서는 이러한 기존의 변압식 압축공기저장 발전 방식의 문제점을 해결하기 위해 새로운 방식의 정압식 압축공기저장 발전 방식을 제시하고 있으며 [3], 엑서지 개념을 포함한 에너지 분석을 통해 에너지 밀도 증가와 효율 향상 효과를 예측하였다. 새로운 방식의 정압식 압축공기 저장 발전 방식은 공압식 양수발전과 정압식 압축공기저장 발전의 하이브리드 개념으로 기존 변압식 압축공기저장 발전 방식에 비해 정압 운전에 의한 효율향상과 에너지 밀도 증가로 압축공기 저장조의 크기를 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다.

2. 정압식/변압식 압축공기저장(CAES) 발전 시스템

2-1. 변압식 압축공기저장 발전

현재 건설된 모든 CAES 발전소는 고정된 부피의 압축공기 저장조에 압축공기를 충전/방출함으로써 충전시 압력이 상승하고 방출시 압력이 감소하는 변압식의 CAES 발전 방식이다. 변압식 CAES 발전의 경우 압력 변동폭을 일정범위로 제한하기 위해 압축공기 저

장조의 크기를 크게 건설하는 것이 일반적이는데, 예를 들어 충전되고 방출되는 압축공기 부피보다 5배 이상 압축공기 저장조의 부피를 크게 하면 압력 변동율을 20%내로 유지할 수 있게 된다. 독일의 Huntorf 발전소의 경우 압축공기 저장조의 압력이 48~66 bar 범위로 운전을 하며 터빈 입구 압력이 46 bar가 되도록 일정하게 조절하여 운전을 하고 있고, 미국 McIntosh 발전소의 경우는 압축공기 저장조의 압력이 45~74 bar 범위로 운전을 하며 터빈 입구 압력이 45 bar가 되도록 일정하게 조절하여 운전을 하고 있다 [5]. 최근 인공의 지상 압축공기 저장조를 사용하는 EPRI 발전소의 경우는 저장조 비용 절감을 위해 효율감소에도 불구하고 압력 변동폭을 55~103 bar 범위로 넓게 운전을 하며 터빈 입구 압력이 55 bar가 되도록 일정하게 조절하여 운전을 하고 있다 [6].

2-2. 정압식 압축공기저장 발전

최근 Kim과 Favrat [2-4]은 압축공기저장 발전 시스템에서 변압식 운전에 의한 효율 감소와 압축공기 저장조 부피 증가에 의한 비용 증가 문제를 해결하기 Hydraulic 에너지 저장과 압축공기저장 발전이 결합된 새로운 방식의 정압식 압축공기저장 방식을 제안하였다. 시스템 구성은 Fig. 1과 같이 하부에 물을 저장하면서 압축공기가 출입하는 좌측의 개방형 압축공기 저장조와 이와 하부 부분이 연결관으로 연결되어 물이 출입하면서 압축공기를 압축/팽창하는 우측의 밀폐형 압축공기 저장조로 구성된다. 작동원리는 Fig. 2와 같이 압축기에 연결되어 CAES 발전을 위한 압축공기를 좌측의 압축공기 저장조에 충전할 때 저장되는 압축공기 부피와 같은 양의 물을 좌측의 개방형 압축공기 저장조에서 우측의 밀폐형 압축공기 저장조내로 물을 펌핑하면서 좌측의 압축공기 저장조의 압력을 일정하게 유지한다. 반대로 압축공기를 좌측의 압축공기 저장조에서 팽창기(터빈)으로 방출할 때는 방출되는 압축공기 부피와 같은 양의 물을 우측의 밀폐형 압축공기 저장조에서 좌측의 개방형 압축공기 저장조로 흐르게 하면서 터빈으로 공급되는 압력을 일정하게 유지하고 동시에 수압모터(수차)를 구동하여 발전을 하게 된다. 우측의 밀폐된 압축공기 저장조는 CAES 발전을 위한 좌측의 압축공기 저장조의 압력을 일정하게 유지하면서 동시에 Hydraulic 에너지 저장의 역할을 하게 된다.

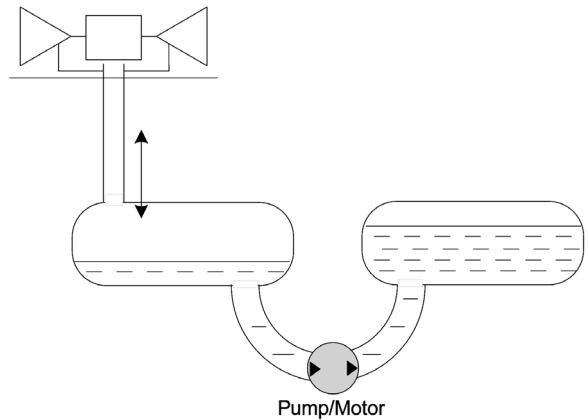


Fig. 1. Constant-pressure air storage combined with hydraulic energy storage.

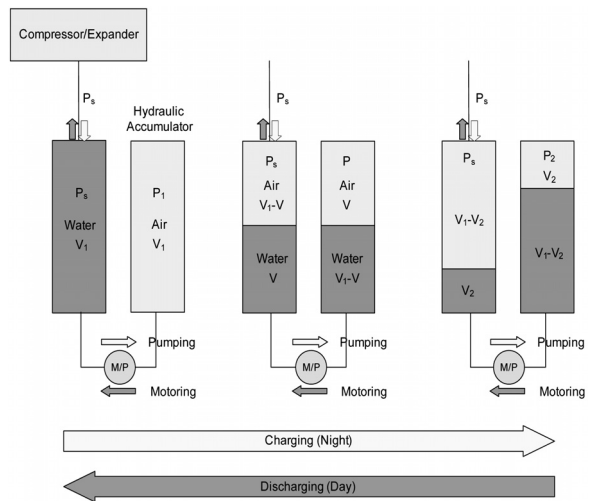


Fig. 2. Operation process of constant-pressure air storage system combined with hydraulic energy storage.

3. 정압식/변압식 압축공기저장(CAES) 발전 시스템 에너지 분석

3-1. 에너지 및 엑서지 분석

제시된 새로운 정압식 압축공기저장(CAES) 발전 시스템의 에너지 및 엑서지 분석을 위해 다음과 같은 가정들이 상용되었다.

- (a) 압축가스(공기)는 이상기체와 같은 상태방정식을 따른다.
- (b) 액체(물)는 비압축성으로 가정하였다.
- (c) 가스와 액체의 흐름에서 운동에너지와 위치에너지의 효과는 무시되었고, 상변화와 화학적 반응은 없다고 가정하였다.

(d) 가스와 액체의 흐름에서 관속에서의 압력손실은 무시되었다.

Fig. 2에 제시된 새로운 정압식 압축공기저장(CAES) 발전 시스템에서 두 저장조의 부피는 V_1 으로 같도록 구성된다. 일정한 압력 P_s 으로 압축공기를 저장하기 시작할 때 압축기에 연결된 좌측의 압축공기 저장조는 물로 채워져 있고 우측의 밀폐된 저장조내 압력은 P_s 보다 높은 P_1 을 유지하고 있다. 압축공기 저장을 마칠 때 우측의 밀폐된 저장조내 부피는 V_2 로 감소하고 압력은 P_2 로 상승하며, 우측의 저장조로 이동된 물의 부피인 $V_1 - V_2$ 만큼 좌측의 압축공기 저장조에는 P_s 의 압축공기가 충전되게 된다. CAES 발전을 위해 좌측의 압축공기 저장조에 저장된 압축공기를 P_s 의 압력으로 일정하게 방출할 때 과정은 충전과정의 역과정이며, 좌측의 압축공기 저장조에 저장된 압축공기 에너지로부터 팽창기(터빈)에서 동력이 발생되고 우측의 저장조에 저장된 Hydraulic 에너지로부터 수차에 의해 동력이 발생된다.

압축공기에 저장된 에너지로부터 발생할 수 있는 최대의 일은 저장된 압축공기의 엑서지(Exergy)로 나타낼 수 있다. 운동에너지와 위치에너지를 무시하면 저장된 압축공기의 단위질량당 엑서지는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k = h - h_0 - T_0(s - s_0) \quad (1)$$

여기에서 k 는 단위질량당 압축공기의 엑서지, h 와 s 는 각각 엔탈피와 엔트로피, 하첨자 '0'은 사장상태(Dead State)인 주위 환경의 온도와 압력 상태에서 물성치를 나타낸다.

압축공기 저장조에서 터빈 입구로 공급되는 압축공기의 온도는 대기온도와 큰 차이가 없으므로 온도 차이를 무시하면 식 (1)의 엑서지는 다음과 같이 나타내어진다.

$$k = rT_0 \ln \frac{P}{P_0} \quad (2)$$

여기서 r 은 특정 기체 상수(Specific Gas Constant)를 나타낸다.

한 주기 동안 좌측의 압축공기 저장조에 저장되는 압축공기의 질량 m_s 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$m_s = \frac{PV}{rT} = \frac{P_s(V_1 - V_2)}{rT_0} \quad (3)$$

한 주기 동안 저장되는 압축공기의 총 엑서지 E_a 는 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같이 주어진다.

$$E_a = m_s k = P_s(V_1 - V_2) \ln \frac{P_s}{P_0} \quad (4)$$

Hydraulic 에너지 저장의 경우 단위질량의 물을 펌프에 의해 P_i 에서 P_f 로 펌핑함으로써 저장되는 Hydraulic 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$w_l = (P_f - P_i) / \rho \quad (5)$$

또한 펌프에 의해 이동되는 물의 질량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dm_l = -\rho dV \quad (6)$$

여기서 ρ 는 물의 밀도이며 V 는 우측 저장조 내의 밀폐된 압축공기의 부피이다.

또한 이동되는 물에 의해 우측의 저장조 내의 밀폐된 압축공기의 압축에 의한 압력변화는 폴리트로픽 과정($PV^n = const$)으로 모사될 수 있다.

한 사이클 동안 펌프에 의해 물을 좌측의 압축공기 저장조(압력: P_s)로부터 우측의 밀폐된 저장조(압력: P)로 펌핑함으로써 저장되는 총 Hydraulic 에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} E_h &= \int w_l dm_l = \int_{V_1}^{V_2} \left(\frac{P - P_s}{\rho} \right) (-\rho dV) = \int_{V_1}^{V_2} (P_s - P) dV \\ &= \int_{V_1}^{V_2} \left(P_s - \frac{P_1 V_1^n}{V^n} \right) dV \\ &= \frac{P_2 V_2 - P_1 V_1}{n-1} - P_s (V_1 - V_2) \quad (n \neq 1) \\ &= P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} - P_s (V_1 - V_2) \quad (n = 1) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 압축과정의 폴리트로픽 지수 n 은 등온과정인 경우 1이 된다.

현재 천연가스 저장을 위한 지하의 복공식 암반 공동이나 상용 고압 용기의 경우 최대 허용 압력은 대략 300 bar 정도이므로 본 연구에서는 P_2 의 최대값을 300 bar로 가정하였다. 또한 압축공기 저장 압력 P_s 는

에너지 저장 밀도, 효율, 시스템의 경제성 등을 함께 고려하여 최적화되며 일반적으로 CAES 팽창기(터빈)에 공급되는 압력은 50 bar 전후이므로 [5] P_s 는 50 bar로 가정하였다.

우측의 밀폐된 저장조의 압축공기의 경우 압력비 (P_2/P_1)가 6 이하인 압축과정이 심야에 6시간 이상 느리게 진행되므로 주위와의 열전달에 의해 거의 등온과정($n=1$)에 가깝다고 할 수 있다.

3-2. 변압식 압축공기저장 발전 에너지 분석

CAES 발전시 압축공기 저장조의 압력이 P_{s1} 에서 P_{s2} 으로 변하는 경우 일반적으로 팽창기(터빈) 입구 압력은 P_{s1} 으로 일정하게 조절하여 공급되는데 이때 엑서지 손실을 \dot{L}_t 와 한 사이클(저장조의 압력이 P_{s2} 에서 P_{s1} 까지 변하는 주기 T) 동안 발생하는 총 엑서지 손실 L_t 는 아래와 같이 정의된다.

$$\dot{L}_t = \frac{k(t) - k_{PS1}}{k(t)} \quad (8)$$

$$L_t = \frac{\int_0^T \dot{m}(t)k(t)dt - \int_0^T \dot{m}(t)k_{PS1}dt}{\int_0^T \dot{m}(t)k(t)dt} \quad (9)$$

$$\dot{m}(t) = \frac{dm}{dt} = -\frac{V_s}{rT} \frac{dP_s(t)}{dt} \quad (10)$$

여기서 $k(t)$ 는 식 (2)의 압축공기의 엑서지, k_{PS1} 는 P_{s1} 으로 압력이 조절된 압축공기의 엑서지, V_s 는 압축공기 저장조의 부피, T 와 P_s 는 각각 압축공기 저장조 내의 온도와 압력을 나타낸다.

3-3. 정압식 압축공기저장 발전 에너지 분석

Fig. 3과 같은 Hydraulic 에너지 저장과 결합된 정압식 CAES 발전 시스템에서 한 주기 동안 저장되는 총 에너지 E_t 는 식 (4)의 좌측 압축공기 저장조에 저장된 압축공기 에너지 E_a 와 식 (7)의 우측 저장조에 저장된 Hydraulic 에너지 E_h 의 합으로 나타내어진다.

$$E_t = E_a + E_h \quad (11)$$

$$E_a = P_s(V_1 - V_2) \ln \frac{P_s}{P_0} = P_s V_1 \left[\left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \ln \frac{P_s}{P_0} \right] \quad (12)$$

$$= P_s V_1 \left[\left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \ln \frac{P_s}{P_0} \right]$$

$$E_h = P_1 V_1 \ln \frac{V_1}{V_2} - P_s(V_1 - V_2) = P_s V_1 \left[\frac{P_2}{P_s} \left(\frac{V_2}{V_1}\right) \ln \frac{V_1}{V_2} - \left(1 - \frac{V_2}{V_1}\right) \right] \quad (13)$$

$$= P_s V_1 \left[\frac{P_2}{P_s} \frac{1}{\beta} \ln \beta - \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) \right]$$

여기서 β 는 우측 밀폐된 저장조의 압축공기의 압축 부피비 V_1/V_2 를 나타낸다.

일반적으로 CAES 발전시스템에서는 압축된 압축공기를 가열하여 발전하는 경우가 많으므로 실제 현존하는 CAES 발전소에서는 압축공기를 700°C 이상 가열하여 압축공기에 저장된 엑서지보다 2배 이상의 동력을 얻게 된다. 따라서 압축공기의 가열효과를 고려한 발전출력은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$P_t = E_a \times HF + E_h \quad (14)$$

여기서 HF 는 CAES 발전 시스템에서 압축공기의 가열계수(heating factor)를 나타낸다.

4. 결과 및 토의

일반적으로 기존 변압식 CAES 발전 시스템의 경우 팽창기(터빈)에서 일정한 출력을 얻기 위해서 공급되는 압축공기는 일정한 압력(P_{s1})과 일정한 유량(\dot{m})으로 공급된다. Fig. 3은 Huntorf 발전소의 경우 한주기

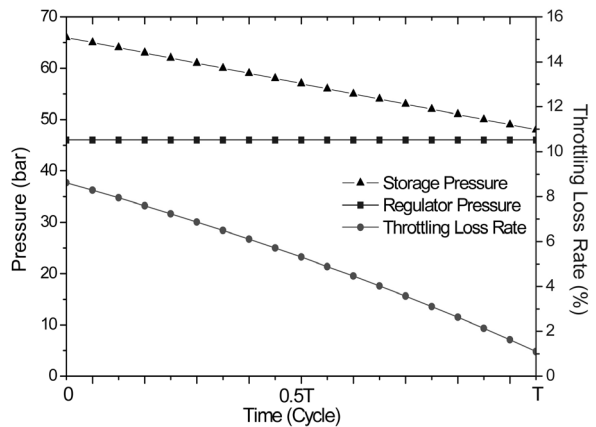


Fig. 3. Throttling exergy loss in Huntorf CAES plant.

Table 1. Characteristics of some existing CAES plants with varying pressure of air storage.

Site	Capacity (MW)	P_{s1} (bar)	P_{s2} (bar)	P_{s2}/P_{s1}	L_t (%)
Huntorf	290	48	66	1.38	5.2
McIntosh	110	45	74	1.64	6.6
EPRI	15	55	103	1.87	7.9

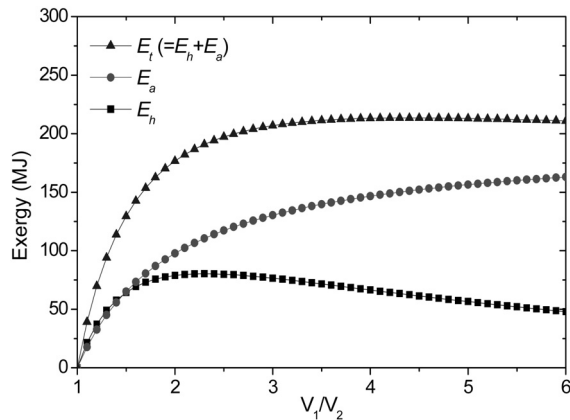


Fig. 4. Exergy analyses of the new constant-pressure CAES system (w/o heating, $P_2= 300$ bar).

동안의 압축공기 저장조의 압력(P_s) 변화와 엑서지 손실율(\dot{L}_t)을 나타내었다. Table 1은 현존하는 CAES 발전소의 운전 압력범위와 한 주기 동안 Throttling에 의한 총 엑서지 손실(L_t)을 나타내었다. 실제적으로는 팽창과정에서 압력조절에 의한 Throttling 손실 뿐만 아니라 압축과정에서도 압력변화에 의해 설계 압력비로부터 벗어남으로서 효율 감소를 발생하게 된다.

Fig. 4는 새로운 정압식 CAES 발전 시스템에서 Hydraulic 에너지 저장을 위한 우측 저장조의 최고 압력인 P_2 를 300 bar로 할 경우 저장조의 단위부피당 ($V_1=1 m^3$, 좌우측 저장조의 부피의 합은 $2V_1$) 저장된 Hydraulic 에너지 E_h , 압축공기 에너지 E_a , 총 에너지 E_t 를 나타내었다. Hydraulic 에너지는 압축비 $\beta=2.3$ 에서 최고치인 $E_h=8.05 MJ$ 을 보이며, 압축공기 에너지는 압축비가 증가할수록 증가하며 $\beta=6.0$ 에서 최고치인 $E_a=16.3 MJ$ 을 보인다. 이 두 에너지의 합인 총 저장 엑서지는 $\beta=3.7$ 에서 최고치인 $E_t=21.25 MJ$ 를 가진다.

기존 Huntorf CAES 발전소의 경우 P_{s2}/P_{s1} 이 1.38이며 압축공기 저장조 이용율이 27.3%이므로 50 bar의 압축공기가 저장될 경우 같은 부피 $2V_1(2 m^3)$ 에 저장되는 압축공기의 엑서지는 $E_a=10.68 MJ$ 로서 새로운 정압식 CAES 발전 시스템은 기존 변압식에 비해 대략 2배 정도의 에너지 저장 밀도를 가진다.

Fig. 5는 동일한 조건의 정압식 CAES 발전 시스템에서 발전시 압축공기를 가열하여 HF 를 2로 가정할 경우 저장조의 단위부피당 ($V_1=1 m^3$, 좌우측 저장조 부피의 합은 $2V_1$) 저장된 Hydraulic 에너지 E_h , 압축공기

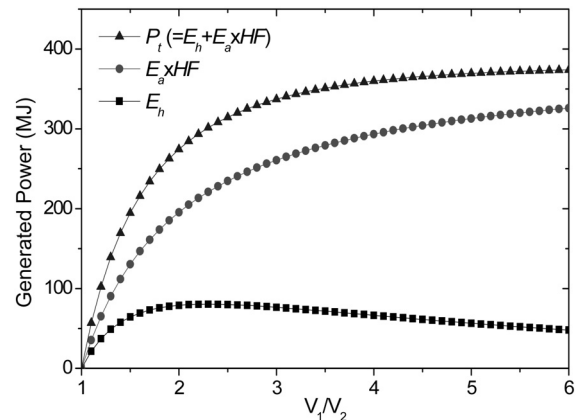


Fig. 5. Exergy analyses of the new constant-pressure CAES system (with heating, $HF= 2$, $P_2= 300$ bar).

에 의한 발전 에너지 $E_a \times HF$, 총 발전 에너지 P_t 를 나타내었다. 압축공기에 의한 발전 출력은 β 가 증가할수록 증가하며 $\beta=6.0$ 에서 최고치인 $E_a \times HF=32.6 MJ$ 을 보인다. 두 발전 에너지의 합인 총 발전 에너지 $P_t = E_a \times HF + E_h$ 는 β 가 증가할수록 증가하며 $\beta=6.0$ 에서 최고치인 $E_t=37.4 MJ$ 를 가진다. 이때 Hydraulic 에너지 저장은 총 발전 에너지의 약 13%를 차지하며 CAES 발전을 위한 압축공기 저장조의 압력을 일정하게 유지하면서 추가적으로 에너지를 저장하는 역할을 하게 된다.

5. 결 론

본 논문에서는 기존 변압식 압축공기저장(CAES) 발전 시스템의 효율 및 에너지 밀도 향상을 위해 공압식 양수발전이 결합된 새로운 정압식 압축공기저장 발전 시스템을 제시하고 있으며, 기존 변압식 CAES 발전 시스템과 비교를 위해 엑서지 개념을 포함한 에너지 분석을 수행하였다. 새로운 정압식 발전 시스템은 압력 변동율이 40%($P_{s2}/P_{s1}=1.4$)인 기존 변압식 CAES 발전시스템에 비해 에너지 저장 밀도가 2배 이상 향상되어 압축공기 저장조의 부피를 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 정압조건으로 압축과 팽창이 이루어지므로 기존 변압식 CAES 발전에서 팽창시 발생하는 Throttling 손실과 압축시 설계점으로부터 벗어남으로서 발생하는 효율 감소 문제를 해결할 수 있으므로 시스템 효율을 향상시킬 수 있다.

새로운 정압식 CAES 발전 시스템에서 발전시 압축공기를 가열하는 경우 대부분의 에너지는 압축공기

발전에서 발생되며 Hydraulic 에너지 저장은 CAES 발전을 위한 압축공기 저장조의 압력을 일정하게 유지하면서 추가적으로 에너지를 저장하는 역할을 하게 된다. 또한 Hydraulic 에너지 저장은 CAES 발전 보다 응답성이 훨씬 빠르기 때문에 전압과 주파수 안정화 등 전력품질 향상을 위한 에너지 저장 역할을 할 수 있는 장점을 가짐으로서 공압식 양수발전과 결합된 정압식 CAES 발전시스템은 큰 시너지 효과를 가진다고 할 수 있다.

참고문헌

1. 김영민, Daniel Favrat, “분산형 압축공기 전력저장 기술”, 전기저널, No. 357, 45-57, (2006).
2. Kim YM, Favrat D, Energy and exergy analysis of a micro compressed air energy storage and air cycle heating and cooling system. Energy 35, 213-220 (2010).
3. US Patent 7,663,255. Compressed-Air-Storing Electricity Generating System And Electricity Generating Method Using The Same.
4. Samir Succar and Robert H. Williams. Compressed Air Energy Storage: Theory, Resources, And Applications For Wind Power, Princeton Environmental Institute Report, 8 April 2008.
5. A. Ter-Gazarian. Energy Storage for Power Systems. UK: The Institution of Engineering and Technology (2008).
6. Nakhmkin M, Chiruvolu M. Available Compressed Air Energy Storage (CAES) Plant Concepts, Power-Gen Conference-MIN, December 2007.