

전력 계통에의 이용을 위한 후프 에너지 저장 시스템

백광현, 정기형

서울대학교 원자핵공학과

Hoop Energy Storage System(HESS) for Electric Power Utility

Kwang Hyun Paek, Kie Hyung Chung

Department of Nuclear Engineering, Seoul National University

요 약

한국에 있어서의 하루 동안의 부하 평준화를 중심으로 전력 계통에의 적용을 목적으로 한 후프 에너지 저장에 관하여 논의하였다. 동일 목적을 위한 다른 여러 경합 방식들과의 비교가 이루어졌으며 이로부터 후프 에너지 저장의 실제 적용 가능성을 제시하고 1994년의 전력 수급 현황을 자료로 하여 일차적인 적정 시스템 변수의 도출이 이루어졌다. 또한 이의 적용을 위해 필수적인 관련 기술로서 자기 압력을 이용한 비접촉성 지지 방식 및 대용량의 전력 변환 방식등에 대해 논의하였다.

Abstract - Hoop Energy Storage System(HESS) for electric power utility were discussed laying primary stress on the diurnal load leveling of Korean electric power system. A number of potential storage technologies are outlined and possibility for real application of HESS was suggested. Primary system variables were determined on the basis of state of electric power demand-supply of 1994. As a prerequisite technology for HESS, noncontacting support using magnetic pressure and high power conversion were discussed.

1. 머릿말

1-1. 에너지 저장의 필요성

기술 집약 산업으로의 이전 및 생활 수준의 향상에 따라 연간 총 전력 에너지 수요는 매년 증가하고 있으며 사회의 주기적 활동에 의해 주야, 주간, 계절에 따른 전력 수요가 큰 변동을 나타내고 있다. 또한 자동화 설비의 보편화에 따라 안정적인 전력의 공급에 대한 필요성이 증대되고 있다. 전력은 생산과 소비가 동시이어야하는 특수성 때문에 최대 전력 수요를 대비하여 총발전량이 결정되며 부하 변동에 따라 적절히 조절되어야 하므로 최대 전력 수요는 전력 계통 운영 계획에 있어서 가장 기본이 되는 중요한 변수이며 이로 인해 발전 설비, 송변전 설비, 배전 설비 등의 신규 설비 투자가 결정된다. Table

1은 최대 전력 수요를 포함한 우리나라의 최근 5년간의 주요 전력 통계 지표¹⁾이다. 최대 전력 수요가 증가함에 따라 발전 설비 역시 증가해 왔음을 알 수 있다. 그러므로 일정한 에너지를 생산하면서도 최대

Table 1. 최근 5년간의 우리나라의 주요 전력 통계

구분	1990	1991	1992	1993	1994
발전설비 (MW)	21,021	21,111	24,120	27,654	28,750
총발전량 (GWhr)	107,670	118,619	130,963	144,437	164,993
최대전력 (MW)	17,252	19,124	20,438	22,112	26,696
평균전력 (MW)	12,291	13,541	14,909	16,488	18,835
부하율(%)	71.2	70.8	72.9	74.6	70.6
이용률(%)	58.4	63.8	64.9	61.6	65.4

전력 수요를 줄일 수 있다면 신규 설비 투자를 감소시킬 수 있으며 이와 함께 설비 이용률을 향상시킬 수 있어 전력 생산비 감소에 기여할 수 있게 된다. 바꾸어 말하면 최대 부하에 대한 평균 부하의 비율을 나타내는 부하율을 향상시키는 것이 전력 사업의 큰 목표중의 하나라고 할 수 있다. 이와 관련하여 세계 각국에서는 수요 관리^{2,3,4)}(DSM : Demand Side Management)라는 개념을 도입하여 양수 발전 등의 에너지 저장 장치와 같이 수용가의 의사와는 무관하게 취해지는 전력 회사의 관리 및 전기 요금의 차등화와 같이 전력 회사의 유도에 의해 수용가에 의해 취해지는 관리등의 부하 관리(Load Management)를 통해 최대 부하 억제, 부하 평준화등에 노력하고 있는 실정이다. 특히 근래에 들어서 환경 문제가 심각하게 대두되면서 발전 설비의 건설 부지 확보의 어려움이나 국제 환경 규제의 심화는 수요 관리의 필요성을 더욱 제고시키고 있다.

변동이 심한 전력 수요에 대비하기 위해서는 기저 부하용의 원자력이나 석탄 화력같이 출력 변화가 경직적인 발전 설비의외에 짧은 시간내에 부하 변동에 따라 운전 및 정지가 가능한 침투 부하용 디젤 엔진등이나 가스 터빈등의 발전 설비가 부가적으로 필요하게 된다.⁵⁾ 그러나 이와 같은 설비들은 전력 에너지의 발생만이 가능하므로 부하 관리에는 이용될 수 없는 반면 에너지 저장 시스템의 경우 수요가 적은 심야 시간대의 잉여 전력을 저장하여 수요가 큰 시간대에 방출함으로써 발전측면에서 볼때 최대 부하의 억제와 부하 평준화를 통해 부하율 증가의 효과를 얻을 수 있다.

1-2. 에너지 저장 방식

효과적인 에너지 저장의 이용을 위해서는 1) 전력과 저장 에너지 간의 상호 변환이 신속, 용이하며 2) 저장 및 변환시의 손실이 적고 3) 적절한 제어 하에 전력을 저장, 방출할 수 있어야 한다. 양수 발전은 현재 가장 널리 이용되는 형식이나 낮은 효율과 입지 선정의 제약으로 인하여 많은 다른 저장 기술들이 이의 대체를 위하여 현재 개발중에 있다. Table 2⁶⁾는 현재 이용되거나 개발 중에 있는 각종 전력 에너지 저장 방식의 특징을 나타낸다. 효과적인 설비가 되기 위해서는 효율이나 에너지 밀도가 높고 부지 확보가 용이하며 환경에의 영향이 최소화되어야 한다. 아래에서 보는 바와 같이 회전체의 운동 에너지를 이용하는 관성 에너지 저장 방식은 이러한 요인들을 통합할 수 있는 가능성을 제시하고 있다.

Table 2. 각종 전력 에너지 저장 방식의 특징

	Inertial Energy Storage	Battery	Pumped Hydro	Compressed Air/Gas	SMES
Type	kinetic	chemical	potential	internal	magnetic
Efficiency	~80%	~70%	~60%	~60%	~90%
Energy Capacitance	high	medium	high	high	high
Energy Density	high	medium	low	low	medium
Site Availability	high	high	low	low	low
Life Time	long	medium	long	long	long
Environmental Impact	low	medium	large	large	large
Availability	under development	now	now	now	under development

2. 후프 에너지 저장

2-1. 에너지 저장의 원리

관성 에너지 저장의 기본 개념은 회전체의 운동 에너지의 형태로 전력을 저장하고 이 저장된 에너지를 다시 전력으로 변환시키는 것인데 이를 위해서는 두 종류간의 에너지를 변환시킬 수 있는 기구와 회전체를 지지할 수 있는 기구가 필요하다. 에너지 변환에 있어서는 기존의 전동기/발전기와 그 개념이 유사하나 회전체 지지의 경우 기존의 접촉성 지지 방식을 이용할 경우 마찰 손실에 의하여 에너지 저장 효율이 매우 낮아지므로 접촉 없이 회전 운동을 지지할 수 있도록 하여야 한다. 또한 고에너지 밀도를 얻기 위해서는 회전시 발생하는 원심력을 외부 압축력에 의해 보상시켜 회전 속도를 증가시켜야 하는데 이를 위해서 공통적으로 이용될 수 있는 방식으로 자기 압력에 대한 연구가 전세계적으로 진행되고 있다. 이용되는 분야에 따라 자기 부상 혹은 자기 베어링으로 불리는 이 기술은 관성 에너지 저장의 핵심적 부분을 차지한다. 또한 높은 접선 속도에서는 공기 역학적인 마찰 역시 상당히 크게 되므로 회전 시스템의 진공이 필요하게 된다.

에너지 저장을 위해 이용될 수 있는 회전체로서는 Solid Disk(or Cylinder)와 Annular Disk(or Cylinder)가 있다. 비접촉성 지지 방식을 이용하므로 회전축이 필요 없고 또한 에너지 밀도를 증가시킬 수 있다는 점에서 대용량의 시스템인 경우 Annular Disk, 즉 후프가 적합하다.

Fig. 1은 기본적인 관계식의 표현을 위한 후프의 단면도이다.

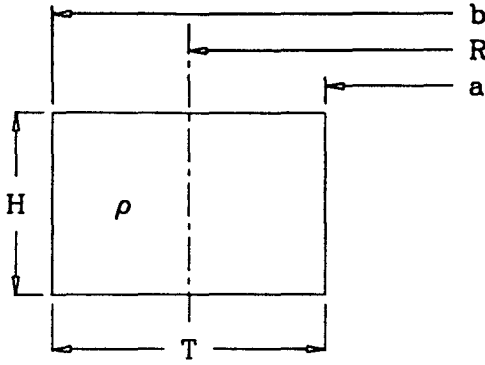


Fig.1. Hoop Dimension

Fig. 1으로부터 후프의 Volume, Mass, Moment of Inertia, Stored Energy와 외경에 P_{comp} 의 압축력이 작용할 경우 Radial and Tangential Stress⁷⁾는 다음과 같다.

$$V = \pi(b^2 - a^2)H$$

$$M = \pi(b^2 - a^2)H\rho$$

$$I = \frac{1}{2} M(b^2 + a^2) = \frac{\pi}{2} (b^4 - a^4)H\rho$$

$$E = \frac{1}{2} I\omega^2 = \frac{\pi}{4} (b^4 - a^4)H\rho\omega^2$$

$$\sigma_r = \frac{3+\nu}{8} \rho\omega^2 (b^2 + a^2 - \frac{a^2 b^2}{r^2} - r^2) - P_{comp} \frac{b^2}{b^2 - a^2} (1 - \frac{a^2}{r^2})$$

$$\sigma_\theta = \frac{3+\nu}{8} \rho\omega^2 (b^2 + a^2 + \frac{a^2 b^2}{r^2} - \frac{1+3\nu}{3+\nu} r^2) - P_{comp} \frac{b^2}{b^2 - a^2} (1 + \frac{a^2}{r^2})$$

만약 후프의 두께가 반경에 비해 훨씬 작다고 가정하면, 즉 $b \approx a \approx T$ 일때 위의 식들은 다음과 같이 근사화 될 수 있다.

$$V = 2\pi RTH$$

$$M = 2\pi RTH\rho$$

$$I = MR^2 = 2\pi R^3TH\rho$$

$$E = \pi R^3TH\rho\omega^2$$

$$\sigma_r = -P_{comp} \frac{r-a}{T}$$

$$\sigma_\theta = \rho\omega^2 R^2 - P_{comp} \frac{R}{T}$$

일반적으로 a_r 는 a_t 보다 상당히 작으므로 a_r 를 최소화 하도록 $P_{comp} = \rho\omega^2 RT$ 로 하면 에너지 밀도 $e(\text{J}/\text{m}^3)$ 는 다음과 같다.

$$e = \frac{E}{V} = \frac{\pi P_{comp} HR^2}{2\pi RHT} = \frac{P_{comp} R}{2T}$$

간략화를 위해 비용은 체적에 비례한다고 가정하고 에너지 밀도와 단위 체적당의 비용 $C_v(\text{원}/\text{m}^3)$ 으로부터 단위 에너지당의 비용 $C_\epsilon(\text{원}/\text{J})$ 을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$C_\epsilon = \frac{C_v}{e} = \frac{2C_v T}{P_{comp} R}$$

위의 식으로부터 효과적인 대용량의 에너지 저장 시스템을 위해서는 반경이나 압축 압력이 커야함을 알 수 있다. Fig.2는 내경 500m, 외경 501m, 밀도 $7850\text{kg}/\text{m}^3$ 인 후프가 $3\text{rad}/\text{s}$ 로 회전할 경우 압축 압력이 없을 때와 압축 압력이 35MPa 일때의 후프 내의 stress 분포이다.

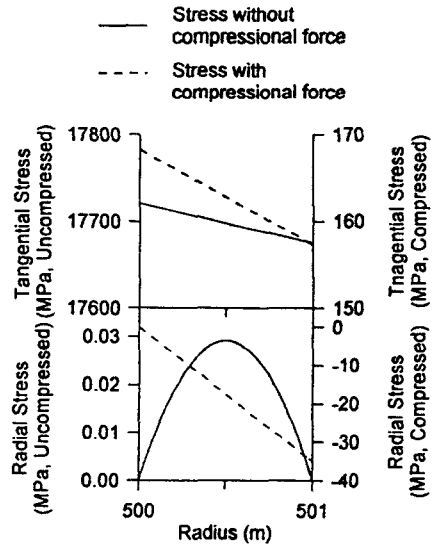


Fig.2. Stress Distribution in Hoop
($a = 500\text{m}$, $b = 501\text{m}$, $\nu = 0.3$, $\rho = 7850\text{kg}/\text{m}^3$,
 $\omega = 3\text{rad}/\text{s}$, $P_{comp} = 35\text{MPa}$)

2-2. 관련 기술

1) 비접촉성 지지 및 진공

후프의 비접촉성 회전 운동의 지지를 위해서는 축 방향 및 반경 방향의 자기 압력이 필요하다. 축방향 자기 압력의 경우 후프의 무게에 해당하는 부상력만 발생시키면 되므로 고회전시의 후프의 원심력을 보상시키는데 필요한 반경 방향의 자기 압력보다는 상당히 작으며 기존의 NdFeB나 SmCo 등의 영구 자석으로도 충분한 압력을 발생시킬 수 있다. 반면 후프의 원심력 보상을 위한 반경 방향의 자기 압력의 경우 수십 MPa정도의 상당히 큰 값이 요구되며 이를 위해 다음의 두가지 방법이 이용될 수 있다.

첫번째로 와류에 의한 반발력을 이용한 방식이다. 이 방식은 능동 제어 없이 후프의 회전 안정성을 보장할 수 있다는 장점이 있으나 낮은 회전 속도에서는 반발력이 매우 작으므로 부가적인 지지 방식이 필요하다는 점과 공회전시에 와류에 의해 발생하는 제동력이 후프에 저장된 운동 에너지를 짧은 시간내에 소멸시키는 단점이 있다.

두번째로 강자성체와 DC 전자석간의 인력을 이용하는 방식으로 와류에 의한 운동 에너지의 감소는 없으나 회전 안정성을 위해 복잡한 능동 제어가 필요하다라는 단점이 있다.

에너지 저장 효율을 높이기 위해서는 자기 압력에 의한 지지 이외에도 후프의 회전이 진공 상태에서 이루어질 수 있도록 하여 공기 역학적인 마찰력을 최소화하여야 한다.

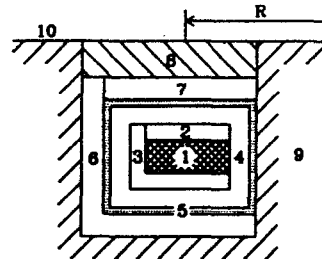
2) 전력 변환

동기기(Synchronous Machine)는 특성상 하나의 기기로 동시엔 전동기 및 발전기의 두가지 형태로 동작이 가능하고 와류 손실이 유도기(Induction Machine)에 비해 상당히 작으므로 후프의 에너지 저장 및 방출을 위해 적합한 변환 기구이다. 즉 심야의 잉여 전력 시간대에는 전동기 모드로 동작하여 전기 에너지를 후프의 운동 에너지로 저장하고 전력 수요가 증가하는 시간대에는 발전기 모드로 동작하여 부족 전력분을 역으로 방출할 수 있도록 한다. 전력 수요의 변동에 따른 적절한 구동 및 제어를 위해서 송전 계통망과 고장자 사이에는 변환기가 필요하게 되는데 교류 전력의 직접적인 변환이 가능한 cycloconverter⁹⁾가 이용될 수 있다. cycloconverter의 경우 고조파 감쇄를 위해 운전 주파수가 전원 주파수의 40% 이하로 제한되는 단점이 있으나 동기기의 극수 조절로 적절한 회전 속도를 얻을 수 있다. 동기기의 경우 회전 속도, 주파수, 극수는 다음의 관계를 갖는다.

$$4\pi f = \omega_s p$$

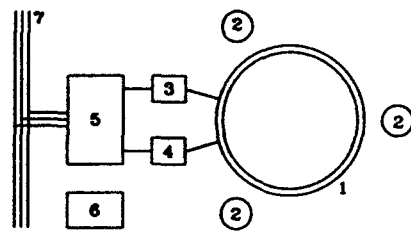
그러므로 60Hz의 전원 주파수에서 전력 변환용 전자석의 극수가 40개이고 cycloconverter의 주파수 변환 영역이 0~10Hz일때 최대 3.14rad/s(30rev/min)의 회전 속도를 얻을 수 있다. cycloconverter의 주파수 변환, 즉 회전 속도의 변환이나 발전기 모드와 전동기 모드간의 변환을 위해서는 전력 수요의 변동에 연동하여 cycloconverter를 구성하는 thyristor의 gate triggering signal을 제어할 수 있는 제어 시스템이 필요하다.

예로써 부상 및 압축을 위해 와류에 의한 반발력을 이용할 경우 후프 에너지 저장 시스템의 단면도와 전력 계통과의 개략적인 배치도는 Fig.3과 같이 나타내 질 수 있다.



1. Hoop
2. Excitation Magnet
3. Conducting Skin
4. Vacuum
5. Vacuum Chamber
6. Levitation & Compression Magnet
7. Power I/O Magnet
8. Backfill
9. Earth
10. Ground Level

(a) Cross Section



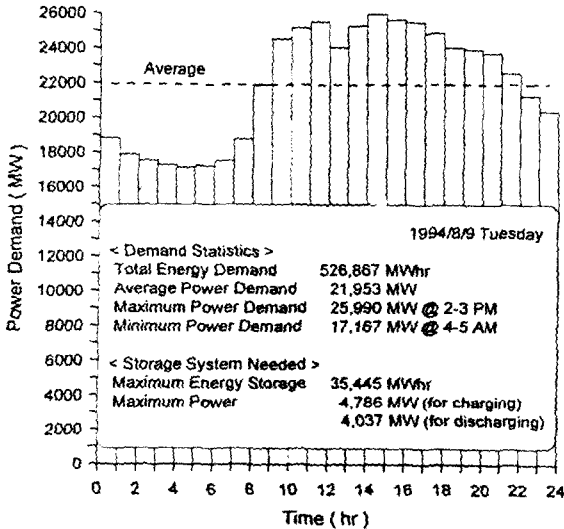
1. Trench
2. Vacuum System
3. Power Conversion Station
4. Magnet Power Supply Station
5. Electrical Switchyard
6. Control & Maintenance
7. Main Utility Line

(b) Layout

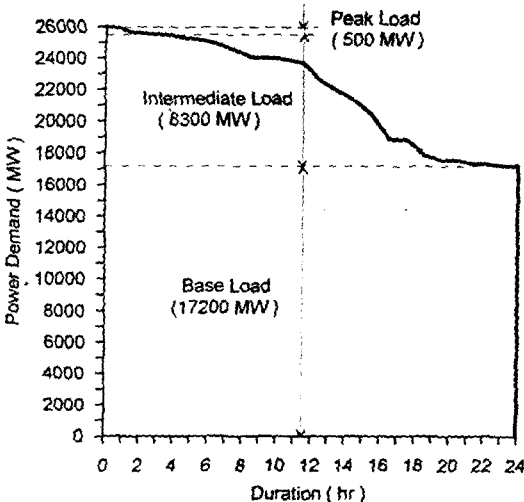
Fig.3. (a) Cross Section and (b) Layout of Hoop Energy Storage System

3. 적용

예로 Fig. 4는 1994년 8월 9일 화요일의 시간에 따른 전력 수요 현황¹⁾과 그때의 부하 지속 곡선(Load duration curve)이다. Fig. 4 (a)에서 볼 수 있는 바와 같이 평균 전력에 비해 최대 전력과 최소 전력은 상당한 차이를 나타내고 있으며 이로 인하여 Fig. 4 (b)에서의 중간 부하(Intermediate load)와 침두 부하



(a) 시간에 따른 전력 수요



(b) 부하 지속 곡선

Fig.4. 1994년 8월 9일의 전력 수요

(Peak load)를 담당하는 발전 설비의 이용률은 감소하게 된다. 반면 총 전력 저장 용량이 약 36 GWhr인 에너지 저장 시스템을 적용하였을 경우 총 발전 설비는 26 GW에서 22 GW로 감소될 수 있으며 이용률을 최대화 할 수 있다.

4. 맺음말

현재의 전력 수급 현황으로부터 에너지 저장 시스템의 필요성을 확인하였다. 다른 여러 방식들과 비교하여 후프 에너지 저장 시스템의 실제 적용 가능성과 장점을 논의하였으며 또한 이를 위한 선결 과제로서 고에너지 밀도를 위한 자기 압축 및 자기 부상, 대용량의 전력 변환 등에 대한 연구의 필요성이 확인되었다.

사용 기호

- a : Inner Radius, m
- b : Outer Radius, m
- C_E : Cost per Unit Energy, 원/J
- C_V : Cost per Unit Volume, 원/m³
- e : Energy Density, J/m³
- E : Kinetic Energy, J
- f : Frequency, Hz
- H : Height, m
- I : Moment of Inertia, kg·m
- M : Mass, kg
- p : Number of Pole
- P_{comp} : Compressional Pressure, Pa
- r : Radius Variable, m
- R : Radius, m
- T : Thickness, m
- V : Volume, m³
- ν : Poisson's Ratio
- ρ : Density, kg/m³
- σ_r : Radial Stress, Pa
- σ_θ : Tangential Stress, Pa
- ω : Angular Velocity, rad/s
- ω_s : Synchronous Angular Velocity, rad/s

참고 문헌

1. "경영 통계", 한국 전력 공사, 1995
2. 최기련, 김창섭, "전력 수요 관리의 기술 개발 방

- 향”, 月刊 電氣 技術, Vol 31, No 7, 1994
3. 도유봉, “전력 수요 관리의 필요성 및 기술”, 電氣 技師, 1995년 2월
 4. 한국 전력 공사 전력 경제 연구실 부하 연구부, “전력 계통의 부하 관리 방안”, 電氣 技師, 1993년 1월
 5. Wildi T., “Electrical Machines, Drives, and Power Systems,” Prentice-Hall, 1991
 6. Abboud R., Hull J., Uherka K., Mulcahy T., “Flywheel Energy Storage using Superconducting Magnetic Bearings,” Proc. Am. Power Conf., Chicago, 1994
 7. Wang C. T., “Applied Elasticity,” McGraw-Hill, 1953
 8. Jayawant B. V., “Electromagnetic Levitation and Suspension Techniques.” Edward Arnold, 1981
 9. Dubey G. K., “Power Semiconductor Controlled Drives,” Prentice-Hall, 1989
 10. “전력 통계 월보”, 제154호, 한국 전력 공사, 1994