

## 0.7MJ SMES의 개념설계

오 봉환<sup>0</sup>, 진 흥범, 류 강식, 류 경우<sup>\*</sup>  
(한국전기연구소 초전소음용연구사업팀, \*전남대학교)

### Conceptual design of 0.7MJ superconducting magnetic energy storage

B.H.Oh, H.B.Jin, K.S.Ryu, K.W.Ryu<sup>\*</sup>  
(Applied Superconductivity Lab. in KERI, \*Chun-Nam Univ.)

**Abstract** A superconducting magnetic energy storage device(SSD) system has been developed to provide power to industrial electric loads subjected to short term voltage disturbances. In this paper, the results of the conceptual design of SSD system are described.

#### 1. 서 론

전력계통으로부터 공급되는 전력의 질은 정전의 방지, 규정 주파수의 유지 및 규정전압의 유지에 달려있다. 이를 위해서는 전력계통 축면에서 그 대책이 필요할 뿐만 아니라, 동시에 전력의 질에 민감한 전기·전자 기기, 제어장치 및 정보기기를 사용하고 있는 수요측에서도 그 대책을 강구하는 것이 합리적이다.

전력의 질을 결정하는 3가지 요소중, 국내의 경우 주파수는 문제가 되지 않으나, 정전 및 전압은 심각한 영향을 미친다. 정전에는 2초 이상 지속되는 전력계통의 사고·오동작에 의한 불시정전 및 계획적인 작업에 의한 작업정전이 있으며, 전력계통의 결체시에 2초 이하 지속되는 순간정전이 있다[1]. 전압에 있어서는, 인접한 전력계통의 사고 및 큰 부하변동으로 인해 짧은 기간동안 규정전압 값을 벗어나는 것을 순간전압변동이라 한다. 계획적인 작업정전에 대해서는 수요측에서 비상전원등으로 대처가 가능하나, 불시정전 및 순간정전에 대해서는 산업체의 경우 생산의 중단 및 제품의 질저하, 수용가의 경우에는 국민생활에 지장을 초래할 가능성이 있다. 또한, 순간전압강하는 만성적이고 고질적인 문제로 전력기기의 성능저하, 수명단축 및 제품의 품질저하를 초래할 수 있다.

순간정전 및 순간전압강하에 대한 대응장치로서 가장 널리 사용되고 있는 것으로 바테리를 에너지저장 요소로 하는 UPS(Uninterruptible Power Supply)시스템으로 일반적으로 CVCF 인버터를 전력변환기로 채택하고 있다[2]. 이와는 별도로 순간 전압강하 대응만을 목적으로 하는 장치 VSS(Voltage Support System)도 있다[2]. 그러나, VSS는 배전선이 완전히 개방된 상태 즉 정전시에는 전압의 보상이 불가능하다는 단점을 갖고 있다.

한편, VSS의 정전에 대한 보상이 불가능한 단점을 해결할 수 있으며, 동시에 순간정전 및 순간전압강하에 효과적으로 대응 가능한 장치인 SSD(Superconducting Magnetic Energy Storage Device)가 미국에서 연구·개발되고 있다[3][4]. 이것 은, 기존의 UPS 및 VSS가 에너지 저장요소로 바테리를 사용하는 것에 비해, 초전도 기술을 이용하여 에너지 저장요소로 초전도코일을 이용하는 초전도 전력저장 장치인 SMES를 사용하는 것이 특징이다. 이 장치는 기존의 UPS 및 VSS가 갖고 있는 단점을 획기적으로 개선 가능하여 짧은 기간동안 고출력

을 가장 효과적으로 낼 수 있는 특징을 갖는다. 저자들은 이와 같은 장점을 갖고 있는 UPS용 SMES로 0.7MJ급의 에너지 저장용량을 갖는 코전도 코일의 연구·개발에着手하고 있다.

본 논문에서는 UPS용 SMES의 장·단점, 적용방식 및 개념 설계 결과에 대해서 기술한다.

#### 2. UPS 및 SMES(SSD)의 적용방식과 장·단점

바테리를 에너지 저장요소로 하는 UPS는 방송, 통신, 항공, 교통관제, 화학 프랜트, 원자력동 공공시설의 제어장치용 비상 전원, 대형컴퓨터의 비상전원 및 병원의 수술실용 비상전원으로 널리 이용되고 있다. 그럼1은 이와같이 비상전원으로 이용되고 있는 UPS시스템의 운전모드를 나타낸 것으로 동작원리는 다음과 같다. 정상시 및 회복시에는 배전선의 A.C.를 정류기에 의해 D.C.로 변환하여 바테리에 충전함과 동시에 CVCF의 입력전원으로 이용한다. CVCF에서는 D.C.를 A.C.로하여 부하에 양질의 전원을 공급한다. 한편, 정전 및 전압강하시에는 바테리에 충전하였던 D.C. 전력을 CVCF를 통해 A.C.로 변환하여 부하에 무정전 상태로 주어진 시간동안 전원을 공급한다. 이와같이 전력의 품질개선 및 정전대응을 주 목적으로 하는 UPS시스템은 충·방전 시간이 길고, 가격이 비싸고, 설치면적이 넓어야 하며, 바테리의 보수 등에 난점이 있는 등의 단점을 갖고 있다.

이에 비해 UPS용 SMES는 기존의 UPS와 같이 별형으로 전 전압을 보상하는 것은 동일하나, 바테리 대신 초전도 코일을 사용하여 기존 UPS시스템의 가장 큰 단점인 충·방전 특성을 개선하여 고속으로 할 수 있다는 특징이 있다. 그럼2에 SMES(SSD)의 운전모드를 나타낸다.

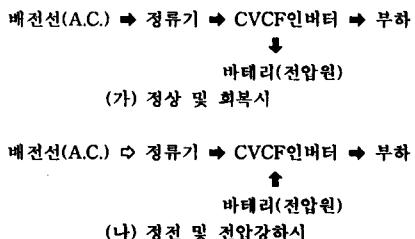


그림1. 기존 UPS시스템의 운전모드

배전선(A.C.) → 절체스위치(정지형) → 부하



정류기



**초전도코일(전류원)**

(가) 정상 및 회복시

배전선(A.C.) ⇌ 인버터 → 부하



전해콘덴서(전압원)



**초전도코일(전류원)**

(나) 정전 및 전압강하시

그림2. SMES(SSD)시스템의 운전모드

이상의 기존 UPS 및 SMES(SSD)의 장·단점을 표1에 표시한다.

표1 기존의 UPS와 UPS-용 SMES(SSD)의 장·단점

| 장 치              | 장    점  | 단    점  |
|------------------|---|---|
| 기존의 UPS          | <ul style="list-style-type: none"> <li>에너지 저장밀도가 높다</li> <li>보호시간이 길다<br/>(약 15분 정도)</li> <li>1 kVA에서 1 MVA에 이르기 까지 바테리의 회로 조립만으로 용량에 자유도</li> <li>순간응답이 가능</li> <li>저온부가 불필요</li> </ul>                | <ul style="list-style-type: none"> <li>충방전 시간이 길다</li> <li>수명제한<br/>(미국 조사: 충방전사이클이 약 100회 정도, 일본의 조사: 소용량 3년, 중대용량 8년)</li> <li>위험물질(산증발) 사용</li> <li>바테리 처분비용이 고가</li> <li>단락전류가 크다<br/>(즉 전압형 전원)</li> <li>바테리의 상태진단이 어렵다</li> </ul> |
| UPS-용 SMES (SSD) | <ul style="list-style-type: none"> <li>고속 충방전 가능<br/>(즉 보호시간이 짧고, 고출력용 비상전원으로 최적)</li> <li>수명이 반영구적<br/>(잦은 순시운전을 하여도 바테리와 같은 일화가 없음)</li> <li>순간응답 가능</li> <li>보수가 용이<br/>(초전도코일의 상태진단이 용이)</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>소용량에서 가격이 비싸다<br/>(1 MVA 이상이고 보호시간이 짧을 경우 경제성이 있음)</li> <li>저온부가 필요</li> </ul>   |

이상의 UPS시스템, VSS, SMES(SSD)시스템은 모두 정전 및 순간전압강하에 치명적인 영향을 받는 부하를 보호하기 위한 비상용 전원의 일종으로서, 그 보호시간에 따라서 선택이 상이할 것으로 생각된다. 보호시간에 따른 비상용 전원장치를 표2에 표시한다.

표2 보호시간에 따른 정전 및 전압강하 대응장치

| 보호 시간  | 최 적 의 장 치    |
|--------|--------------|
| 1초 이하  | VSS          |
| 수십초 이하 | SMES(SSD)시스템 |
| 수십분 이하 | 기존 UPS시스템    |
| 그 이상   | 비상용발전기       |

### 3. UPS-용 SMES의 개념설계

#### 3.1 개념설계 flow chart

본 장에서는 UPS-용 0.7MJ SMES의 초전도 코일 설계에 있어서 기본이 되는 개념설계에 대해서 기술한다.

코일의 설계를 위해서는 먼저 초전도 도체의 설계가 행해져야 한다. 이를 위해서는 초전도 소선에 대한 안정성 해석 및 특성실험이 선행되어야 하며, 이를 토대로 샘플 도체를 설계·제작하여 특성실험을 행하여야 하고, 코일설계 프로그램을 개발하여야 한다. 본 개념설계에서는, 샘플도체의 특성실험이 선행되어 있지 않으므로 참고문헌(5)의 개념설계에서 채택한 도체를 이용하여 UPS-용 0.7MJ SMES 초전도 코일의 개념설계를 행한다.

SMES-용 초전도 코일의 개념설계를 위한 flow chart를 그림3에 나타낸다.

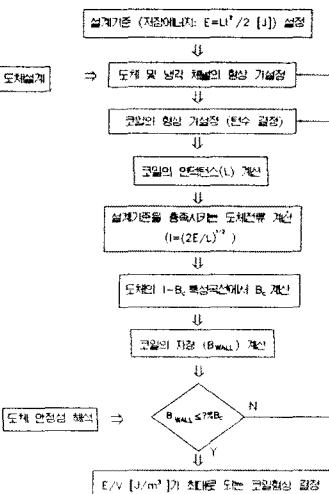


그림3. UPS-용 SMES 초전도 코일의 개념설계 flow chart

설계의 흐름은 다음과 같다. 설계 기준으로서 저장에너지지를 지정하고, 도체설계에 의한 도체의 크기와 냉각의 안정을 위한 냉각체널의 크기를 설정한다. 이를 토대로 코일의 형상을 가설정, 즉 코일의 면수를 결정한다. 이 면수를 이용해 인덕턴스를 계산한 후, 설계 기준을 만족하는 운전전류(즉 도체전류)를 정한다. 이 전류의 값과 도체의 임계자장 값과의 특성곡선을 이용해 임계자장의 값을 구한다. 이것은 일정 자장하에서 도체에 흘릴 수 있는 전류는 한계가 있기 때문이다. 다음은 코일에 전류를 흘렸을 때 발생하는 최대 자장의 값을 계산한다. 이 최대 자장은 코일의 중심 내벽에서 발생한다.

도체의 설계에 있어서 중요한 것으로, 선재의 고 전류밀도화를 들수 있다. 즉 경제성이 좋아야 한다. 이를 위해서는 도체의 안정성 해석을 통해 고 전류밀도화를 이룩할 수 있는 자장의 값을 알아야 한다. 이 해석 결과를 이용해, 도체의 임계자장에 얼마만큼의 여유도(stability margin)를 주었을 때 도체에 고전류밀도화가 달성되는가를 정해야 한다. 이 여유도를 준 자장의 값이 코일의 내벽에서 발생하는 자장의 값보다 커야 한다. 그렇지 않으면 코일은 불안정하게 되고 펜치가 발생하게 된다.

이상의 과정을 통해 저장에너지 밀도가 최대인, 즉 0.7MJ의 에너지를 저장하기 위해 필요한 코일을 제작하는데 있어서 소요되는 도체의 길이가 최소로 되는 코일의 형상을 정하여야 한다.

### 3.2 개념설계 결과

그림3의 flow chart에 따른 설계 프로그램을 개발하여 0.7MJ SMES의 개념설계를 행하였다. 초전도 마그네트는 초전도체의 물성적 특성 때문에 자장과 전류에 제한을 받으며, 대전류가 흐르기 때문에 용력 또한 크다. 따라서 마그네트의 형상을 결정하는데 있어서는 자장과 전류와의 관계를 고려하여야 한다. 본 개념설계에서는 도체의 전류와 자장의 제한조건을 고려하고, 원하는 자장에너지 용량을 만족시키면서 사용 선재량을 최소화하는 조건 즉 저장에너지 밀도가 최대로 되는 마그네트의 형상을 설계한다.

설계에 있어서의 도체로는 참고문헌(5)의 도체를 이용하였고, 층간핀치 및 텐간핀치를 동일하게 이용하였다. 또한, 코일을 수납하는 cryostat의 제원(내경 640mm)을 제한 사항으로 하였다.

설계 파라메타로서 전류 즉 전류밀도와 자장과의 관계인 자장 안정도 및 도체에서 NbTi가 차지하는 NbTi 분율을 이용하여, 이들이 코일의 형상, 에너지 저장밀도, 도체 전류 및 최대 자장 등에 미치는 영향에 대해서 고찰하였다. 전류와 자장과의 관계 및 NbTi의 분율 계산식을 식(1) 및 (2)에 표시한다.

$$B = \frac{5250 \times 10^6 - I_e / NbTi \text{ 단면적}}{500 \times 10^6} \quad (1)$$

$$\text{NbTi fraction} = \frac{\text{NbTi 단면적}}{\text{도체 단면적}} \quad (2)$$

식(1)의 B margin을 1.0, 0.75, 0.5의 3종류로 하고, 각각의 B margin에 대해서 NbTi fraction을 1.0, 0.5, 0.1의 3종류, 즉 9가지의 설계 파라메타에 대해서 개념설계를 행하였다. 이들의 결과를 표3~표5에 표시한다.

표3 B margin 1.0 일때의 설계 결과

#### (1) 도체

| coil No. | B margin | NbTi fraction | 최대 저장 에너지 밀도 $\times 10^6 [\text{J}/\text{m}^3]$ | 도체전류 [A] | $B_c(I_e)$ [T] |
|----------|----------|---------------|--|----------|----------------|
| 1        | 1.0      | 1.0           | 740.14   | 18.490   | 4.63           |
| 2        | 1.0      | 0.5           | 376.61   | 11.412   | 3.25           |
| 3        | 1.0      | 0.1           | 74.33  | 2.173    | 3.60           |

#### (2) 설계 방침을 만족시키는 코일 형상

| coil No. | 코일내경 [mm] | 코일외경 [mm] | 높이 [mm] | 턴수 [Layer × Turns/Layer] | 인덕턴스 $\times 10^{-3} [\text{H}]$ |
|----------|-----------|-----------|---------|--------------------------|----------------------------------|
| 1        | 626.96    | 628.48    | 265.0   | 1 × 76                   | 4.095                            |
| 2        | 628.48    | 630.0     | 520.0   | 1 × 149                  | 10.75                            |
| 3        | 596.44    | 630.0     | 450.0   | 6 × 129                  | 296.46                           |

표4 B margin 0.75 일때의 설계 결과

#### (1) 도체

| coil No. | B margin | NbTi fraction | 최대 저장 에너지 밀도 $\times 10^6 [\text{J}/\text{m}^3]$ | 도체전류 [A] | $B_c(I_e)$ [T] |
|----------|----------|---------------|--|----------|----------------|
| 4        | 0.75     | 1.0           | 598.41   | 15.808   | 5.48           |
| 5        | 0.75     | 0.5           | 319.61   | 10.226   | 4.00           |
| 6        | 0.75     | 0.1           | 62.26  | 1.924    | 4.39           |

#### (2) 설계 방침을 만족시키는 코일 형상

| coil No. | 코일내경 [mm] | 코일외경 [mm] | 높이 [mm] | 턴수 [Layer × Turns/Layer] | 인덕턴스 $\times 10^{-3} [\text{H}]$ |
|----------|-----------|-----------|---------|--------------------------|----------------------------------|
| 4        | 626.96    | 628.48    | 329.0   | 1 × 94                   | 5.6                              |
| 5        | 626.96    | 628.48    | 615.0   | 1 × 176                  | 13.39                            |
| 6        | 596.44    | 630.0     | 540.0   | 6 × 154                  | 378.2                            |

표5 B margin 0.5 일때의 설계 결과

#### (1) 도체

| coil No. | B margin | NbTi fraction | 최대 저장 에너지 밀도 $\times 10^6 [\text{J}/\text{m}^3]$ | 도체전류 [A] | $B_c(I_e)$ [T] |
|----------|----------|---------------|--|----------|----------------|
| 7        | 0.5      | 1.0           | 401.79   | 11.93    | 6.71           |
| 8        | 0.5      | 0.5           | 233.81   | 8.356    | 5.19           |
| 9        | 0.5      | 0.1           | 45.27  | 1.661    | 5.23           |

#### (2) 설계 방침을 만족시키는 코일 형상

| coil No. | 코일내경 [mm] | 코일외경 [mm] | 높이 [mm] | 턴수 [Layer × Turns/Layer] | 인덕턴스 $\times 10^{-3} [\text{H}]$ |
|----------|-----------|-----------|---------|--------------------------|----------------------------------|
| 7        | 626.96    | 628.48    | 490.0   | 1 × 140                  | 9.834                            |
| 8        | 628.48    | 630.0     | 840.0   | 1 × 240                  | 20.05                            |
| 9        | 602.54    | 630.0     | 885.5   | 5 × 253                  | 507.25                           |

### 3.3 개념설계 결과 검토

개념설계 결과인 표3~표5로 부터 다음과 같은 사항들을 알 수 있다. ① B margin 및 NbTi fraction이 작을 수록 최대 저장에너지 밀도가 작아진다. ② B margin 및 NbTi fraction이 작을 수록 인덕턴스는 커진다. ③ B margin 및 NbTi fraction이 작을 수록 코일에 흘려야 하는 전류 값은 작아진다. ④ 같은 NbTi fraction에 대해서 B margin이 작을 수록 저장이 커진다. ⑤ B margin 및 NbTi fraction이 작을 수록 코일의 총턴수는 많아진다. 즉 권선에 사용되는 선재의 양이 많아짐을 의미한다. ⑥ B margin에 관계없이 NbTi fraction이 동일하면 코일의 내경과 외경이 동일하다. 그러나, 코일의 높이는 NbTi fraction이 0.5일 때가 높아지는 경향을 보이고 있다.

이상의 결과로 부터, B margin 및 NbTi fraction이 작을 수록 소요되는 선재량이 많아져서 인덕턴스는 커지므로 인해서 저장에너지 밀도 및 도체전류가 작아짐을 알 수 있다.

이상은 B margin 및 NbTi fraction이 최대 저장에너지 밀도, 코일의 인덕턴스 및 형상 등에 대한 영향을 고찰한 것이다. 그러나, 이를 이외에도 코일의 용력에 미치는 해석도 하여야 하며, 여러 요인을 종합적으로 고찰하여 SMES용 초전도코일의 최적형상을 도출하여야 한다.

### 4. 결 론

본 논문에서는 순간장전 및 순간진압강하에 대비하는 비상진원장치로 사용하기 위한 UPS용 SMES의 초전도코일의 개념설계를 행하였다. 개념설계 결과, 도체의 저장에 대한 여유도 및 도체단면 중에서 초전도체가 차지하는 비율이 작을 수록 소요되는 선재량이 많아져서 인덕턴스가 커지므로 인해서 저장에너지 밀도 및 도체전류가 작아짐을 알 수 있었다.

#### [참고문헌]

- [1] 대한전기협회 1993/94년도 조사연구논문집 : 「전기의 질 향상에 대한 조사연구」
- [2] 대한전기협회 1989/90년도 조사연구논문집 : 「경제성장에 따른 전력효과 분석 및 대책」
- [3] W.E.Buckles, et al. : "The SSD : A commercial application of magnetic energy storage", IEEE ASC-3, No.1, p.328 (1993)
- [4] M.A.Daugherty, et al. : "SSD operating experience", IEEE ASC-3, No.1, p.204 (1993)
- [5] 한국전력 기술연구원 보고서 : 0.5MJ 초전도에너지 저장장치에 관한 연구 (1)