

50-MVA 2G-HTS 케이블의 실 계통운전

류경우*, 손승호**
전남대*, 한국전력**

Grid operation of the 50-MVA 2G-HTS cable

Kyung-Woo Ryu*, Song-Ho Sohn**

Chonnam National University*, Korea electric Power Corporation Research Institute**

Abstract - 50-MVA 2G-HTS케이블의 장시간에 걸친 실 계통 부하운전의 결과, 피크부하에 대해서도 HTS의 고유한 불안정성인 퀸치가 발생되지 않았으며, 이의 응용에서 커다란 짐이 되는 냉동기 유지.보수.고장 등의 관점에서도 기술적으로 문제는 없음이 규명되었다.

1. 서 론

2세대(2G) 고온초전도(High Temperature Superconductor)케이블의 응용에 걸림돌이 되고 있는 극저온 냉동기는 현재로서도 여전히 필수적이라는 한계는 있지만, 이 HTS 케이블이 고유하게 지니고 있는 높은 전력수송 밀도와 HTS케이블 외부에는 전자장이 전혀 존재하지 않는 친환경적 설비라는 이 두 가지 특성만으로도, HTS케이블의 실 전력계통에서 운전 특성을 검증해 보는 것은 기술적 관점에서 커다란 의의가 있을 것으로 사료되어, 본 연구에서는 KEPCO (Korea Electric Power Corporation)의 한 배전망에서 8 개월간 실 계통 운전을 한 결과에 대해 보고 및 검토를 하고자 한다.

2. 본 론

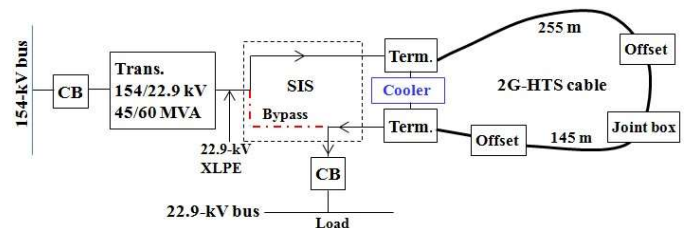
그림 1은 KEPCO의 한 154 kV 변전소에 설치된 22.9 kV 50 MVA급의 HTS(YBCO)케이블에 대한 개략적인 배치도를, SIS(Solid Insulated Switchgear)는 HTS케이블을 계통의 각종 과전압/과전류로부터 HTS케이블을 보호하기 위한 장치를 나타낸다. 그림 1에서 HTS케이블은 154/22.9 kV의 강압용 변압기 중, 한 뱅크와 5 회선의 배전선 (feeders)이 접속된 22.9 kV 모선 사이에 설치되어, 8개월에 걸쳐 실 계통부하 운전시험을 하게 된다.

물론 케이블의 공칭 운전온도/압력/냉매유량은 각각 67 K/3.8 bar-g/0.5 kg/s이며, 극저온 냉각(Cooler)을 위해서는 여분의 냉매(N₂)를 필요로 하지 않는 He기반의 Stirling과 Ne기반의 Brayton 냉동기를 주 냉각장치로 하며, 또한 비상시를 대비하여서는 Sub-cooler를 보조 냉각장치로 구성한 Hybrid 냉각방식으로 되어 있다.

그림 2에서 도체/차폐는 YBCO선재를 2층/1층으로 하여 각각 제작되며, 이들 둘 사이의 전기절연은 PPLP(polypropylene Laminated Paper)로 구성된 3相 HTS케이블 시료의 사진을 나타낸다. 또한 전력 수송 시 도체에 부하전류가 흐르게 되면 도체전류와 크기는 동일하나 방향이 정반대인 전류가 차폐에 유도되어 차폐 외부에는 전자장이 전혀 존재하지 않는 특성을 지니고 있으며, 전력계통 고장 시 큰 고장전류로부터 HTS 도체/차폐를 보호하기 위해 원통형의 동(Cu) 안정화재도 동축 구조로 배열이 되어 있다. 그리고 400 m 길이 방향을 따라 발생될 수도 있는 퀸치(quench)의 위치를 검출하기 위해 케이블 및 접속함의 입/출구에 총 4개의 온도센서(T₃/T₄/T₅/T₆)를 설치했다.

그림 3은 HTS의 AC응용에서 피할 수 없는 히스테리시스성의 교류손실을 평가한 실험 결과를 나타낸다 [1-3]. 그림 3에서 보는 바와 같이 도체와 차폐에는 크기가 동일한 교류전류가 흐르고 있음에도 불구하고, 차폐에서 발생되는 교류손실은 도체와 비교해

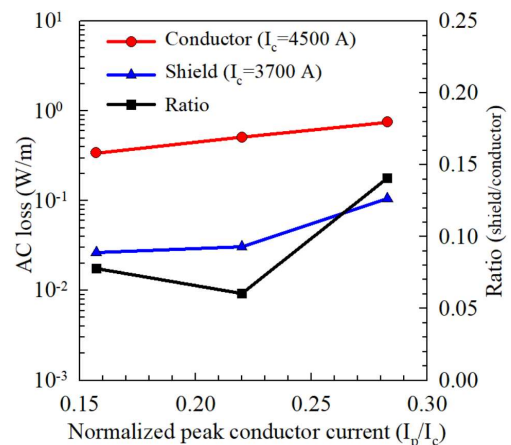
무시 할 수 있을 정도로 매우 작은 것을 볼 수 있고,



<그림 1> 22.9-kV/50-MVA 2G-HTS케이블 시스템의 개략도



<그림 2> 2G-HTS케이블의 시료 사진

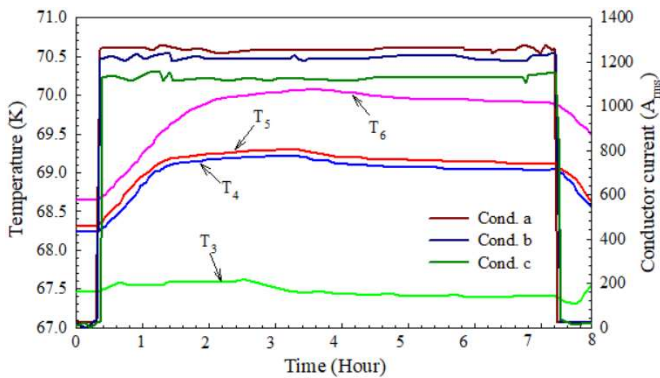


<그림 3> 50-MVA 2G-HTS케이블의 교류손실 특성

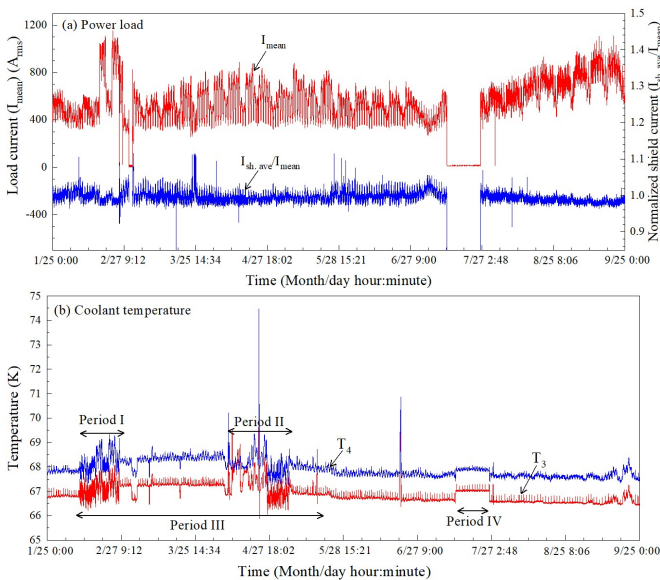
이는 HTS케이블의 불안정한 퀸치가 발생하게 된다면 약 4 mm 두께의 PPLP절연체로 둘러 쌓여 있어, 냉각 측면에서 차폐(냉매 N₂와 직접 닿아 있는 구조)보다는 냉각이 어려운 상태에 있는 도체에서 퀸치가 먼저 발생됨을 암시하고 있다.

그림 4는 HTS케이블을 실 계통 운전에서 앞서 정격

전류인 1200 A_{rms}에서 장시간(약 7시간)에 걸친 3상 통전시험(transport inspection) 결과를 나타내며, 그림 4로부터 보는 바와 같이 케이블/접속함의 입출구 온도($T_3/T_4/T_5/T_6$) 모두가 비정상적으로 급증하는 즉



<그림 4> 50-MVA 2G-HTS케이블의 정격(1200 A_{rms}) 통전시험 결과



<그림 5> 50-MVA 2G-HTS케이블의 8 개월 간 실 계통운전 결과

전력계통에서 최대 피크 부하에 해당하는 정격전류로 될지라도 HTS케이블은 웬치되지 않고, 안정함을 의미한다.

그림 5는 HTS케이블을 KEPCO 배전망에서 8개월 간 실제 전력 부하 운전을 한 결과를 나타내며, 변전소 설비에 대한 유지 보수 공사로 인한 정격에 가까운 부하운전(Period I)에도 불구하고 HTS케이블의 웬치로 인한 차폐전류와 케이블/접속함 입구 온도(T_3/T_4) 모두에 이상 현상이 없음을 볼 수 있고, 이는 2G-HTS케이블은 기술적 측면에서 실 계통 운전에는 문제가 없이 전력수송을 안전하게 할 수 있음을 암시한다. 또한 냉각장치를 구성하는 Stirling냉동기의 유지보수 및 고장수리(Period I, II) 등(Period III: 극저온 냉각용기의 단열성능 저하, Period IV: 154 kV측 선로 교체공사)의 이상의 경우에도 HTS케이블은 안정함을 의미하며, 심지어 주냉각 장치의 문제로 인한 비상시에 투입된 Sub-cooler에 의한 냉각 시, 약 1 K정도의 커다란 온도 동요(fluctuation)에도 불구하고 HTS케이블은 안정하게 전력수송을 잘 감당해 낼 수 있다.

3. 결 론

이상의 22.9-kV/50-MVA 2G-HTS케이블을 KEPCO 배전망에서 8개월에 걸친 실 계통 부하운전 결과를 요약하면, 변전소 설비의 유지보수,고장 등의 경우 즉 정격부하에 가까운 부하에 대해서도 HTS가 고유하게 가지고 있는 불안정성 즉 웬치로부터 안정하였으며, 또한 극저온 냉동기의 유지보수,고장 등의 경우에 보조 냉각장치로 투입된 Sub-cooler 운전모드에서는 1 K 정도의 냉매온도의 큰 동요에도 불구하고 웬치로부터 안정함을 알 수 있었으며, 이는 냉각장치의 지나치게 큰 사이즈 문제 및 지극히 낮은 효율 문제가 해결 될 수 있다면, 고전력밀도 수송특성 및 전자기적 친환경 특성은 도심 인구밀집 지역의 전력수송 기술로 실현 가능성은 기술적 측면에서 충분한 가치가 있음을 시사하고 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] C. Lee, H. Son, Y. Won, Y. Kim, C. Ryu, M. Park, and M. Iwakuma, "Progress of the first commercial project of high-temperature superconducting cables by KEPCO in Korea," *Supercond. Sci. Technol.*, vol. 33, Art. no. 044006, 2020
- [2] W. Xie, B. Wei, and Z. Yao, "Introduction of 35 kV km level domestic secondgeneration high temperature superconducting power cable project in Shanghai, China," *J. Supercond. Nov. Magn.*, vol. 33, pp. 1927-1931, 2020
- [3] Z. Li, K. Ryu, and S. Sohn, "Diagnostic test of the 400-m 22.9-kV 3-phase YBCO cable through single-phase transport method," *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, vol. 35, Art. no. 5400508, 2025