

저손실 22.9 kV급 고온초전도 변압기를 위한 미니 모델 권선의 절연 설계 및 시험 연구

백승명^{*}, 천현권^{*}, 류엔반둥^{*}, 광동순^{*}, 이창화^{*}, 김해중^{**}, 김상현^{*}

경상대학교 및 공학연구원^{*}, 한국전기연구원^{**}

A Study on Insulating Design and Test of Mini-Model windings for a 22.9 kV Class HTS Transformer Reducing AC Loss

Seung-Myeong Baek^{*}, Hyeon-Gweon Cheon^{*}, Van Dung Nguyen^{*}, Dong-Sun Kwag^{*}, Chang-Hwa Lee^{*},
Hea-Jong Kim^{**} and Sang-Hyun Kim^{*}

Gyeongsang National University and Engineering Research Institute^{*}, KERI^{**}

Abstract

This paper presents experimental data from model windings with different arrangement of coil in order to provide information to design a 22.9 kV class HTS transformer. Before experiment, the composite insulation of two different type of HTS transformers are investigated. The first basic of investigation is a breakdown characteristic of liquid nitrogen and flashover characteristic on the GFRP surface under ac and impulse, The second investigation is insulation design, manufacture and test of model windings. These include a AC withstand voltage test of 50 kV rms and a lightning impulse test of 150 kV at peak.

Key Words : Insulation design, AC loss, withstand voltage

1. 서 론

에너지 소비 밀도의 증가, 환경문제에 대한 관심 확대, 전력증설을 위한 부지확보문제 등이 부각됨에 따라 고효율화, 소형화 및 대용량 에너지 전송, 변환이 가능한 초전도 응용 기기의 개발연구가 활발히 진행되고 있다. 이미 급속계 초전도체를 이용한 초전도 MRI 등은 상용화되었고 임계온도 및 자장 특성이 향상된 고온초전도체를 이용한 전력기기 분야의 고온초전도 케이블, 고온초전도 한류기, 고온초전도 변압기, 고온초전도 모터와 발전기 등이 최근 연구결과에 발표되듯이 수 년 내에 실용화가 유력하다고 전망되고 있다[1].

실용화가 유력시되는 기기 중 고온초전도 변압기에 관한 연구 성과로 일본에서는 큐슈대학 및 큐슈전력의 주도 하에 단상 1 MVA급 고온초전도

변압기를 개발하고, 현재 3상 확장 연구 중에 있다. 미국에서는 Waukesa Electric Systems사가 주축으로 5/10 MVA급의 초전도변압기가 개발되어 전력계통에서의 시험 운전을 실시하였고 현재 30 MVA급의 개념설계를 실시하였으며, 독일의 Siemens에서는 전철 응용을 위한 경량 고온초전도 변압기 개발에 주력하고 있다[2].

국내에서는 시험기로서 10 kVA 단상 고온초전도변압기가 순천향대학교에서 개발, 시험되었으며, 현재 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 총 3단계 연구 중 1단계 연구 목표로 단상 1 MVA 22.9/6.6 kV 고온초전도변압기 개발 연구가 한국산업기술대학의 주관으로 진행 중이다. 국내에서 개발하는 고온초전도 변압기는 Double pancake 코일을 교호배치 방식을 채택하여 기기의 컴팩트

화 및 최적 냉각을 위한 연구하여 상용화급 모델 기기를 제작, 시험하였다[3,4]. 하지만 팬케이크의 경우 기기의 컴팩트화는 유리하지만 코일에서 발생하는 교류손실은 나선형보다 높은 것으로 보고 되었으며[5], 교호배치의 경우 팬케이크 끝단에 높은 전계가 발생하기 때문에 전계의 분산이 필요하다. 따라서 교류손실 저감과 전계분산 대책으로 더블팬케이크 코일의 동심배치에 대한 연구가 진행 중이다. 교호배치를 동심배치로 코일의 배치를 달리할 경우 약 2.7-3.2배의 교류손실이 저감될 것으로 기대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 향후 개발될 저손실 고온 초전도 변압기를 위하여 교류손실과 전계분산을 고려하여 코일의 배치가 다른 변압기의 절연구성을 분석하고 절연과피 시험을 통하여 축적한 데이터를 축적하였다. 이 데이터를 이용하여 코일의 배치가 다른 22.9 kV급 미니 모델 변압기를 절연설계 및 제작하여 기존의 변압기 시험방법을 적용하여 내전압 시험을 행하여 비교 분석하였다.

2. 고온초전도 변압기

2.1 교호배치 고온초전도 변압기

현재 개발 중인 1 MVA 고온초전도 변압기는 교류손실 저감과 전계 분산을 위해 더블팬케이크 코일을 교호배치와 동심배치를 고려 중이다.

교호배치 고온초전도 변압기 구성은 크게 저온 용기(cryostat), 철심, 과냉각(66 K<T<77 K)을 위한 냉동기 그리고 권선 부로 구성되고, 저온용기는 FRP(Fiber Reinforced Plastic)로 제작되어 중간에 철심(core)가 관통할 수 있는 동 축 원통 형상으로 열 절연(진공과 super-insulation)이 잘된 극저온 용기로서 철심과 권선 간의 중요한 절연물 역할을 하게 된다. 냉동기는 탑 플랜지(top flange)에 부착되어 권선 외부를 둘러싸는 원통 전도 판을 통해 냉매인 액체질소를 과냉각하게 된다. 액체질소를 과냉각함으로써 도체의 임계전류 특성 향상과 더불어 액체질소의 절연특성을 향상시킬 수 있다.

턴 당 전압이 27.5 V로서 고압측 총 832회, 저압측 240회의 코일이 고압측 8개, 저압측 4개의 더블팬케이크코일로 각각 구성된다. 이 더블팬케이크코일(double pancake coil)은 모듈(module)화 되어 고압측의 경우 8개의 더블팬케이크 코일이 직렬 접속되며, 저압측의 경우 4병렬 도체를 사용한 더블

팬케이크 코일 4개가 직렬 접속하게 된다. 이때 권선의 배치는 더블팬케이크 코일 3개가 위쪽에서부터 고-저-고(H-L-H) 순서로 4회 반복되어 전체 변압기 권선을 구성하게 된다.

2.3 동심배치 고온초전도 변압기

동심배치 고온초전도 변압기 구성은 교호배치와 다른 것이 없으나 코일의 배치가 다른 것이 큰 차이점이다. 현재 검토 중인 1 MVA 고온초전도 변압기는 고압측 총 840회, 저압측 240회의 코일이 고압측 40개, 저압측 20개의 더블팬케이크코일로 각각 구성된다. 이 더블팬케이크코일(double pancake coil)은 모듈(module)화 되어 고압측의 경우, 20개의 더블팬케이크 코일이 직렬 접속되어 저압측의 내측과 외측에 각각 배치된다. 저압측의 경우 4병렬 도체를 사용한 더블팬케이크 코일 20개가 직렬 접속되어 고압측 내부에 놓이게 된다. 즉, 권선의 배치는 더블팬케이크 코일 20개가 직렬로 연결된 원통이 내부에서부터 고-저-고(H-L-H) 순서로 전체 변압기 권선을 구성하게 된다. 표 1에 교호 및 동심배치 변압기 비교하여 나타낸다.

표 1. 교호 및 원통배치 고온초전도 변압기 비교.

코일 배치		교호	동심
설계 용량		1 MVA	
코일 형태		Double Pancake	
보빈수	H.V	8	40
	L.V	4	20
턴수	H.V	832	840
	L.V	240	240
도체수	H.V	1	1
	L.V	4	4

2.3 절연 구조

그림2와 3에 교호배치 및 원통배치 고온초전도 변압기 권선의 고-저-고 순서의 더블팬케이크코일에 대한 절연 구조를 각각 나타낸다. 그림 2는 교호배치에서 변압기를 대칭축(axis of symmetry)에서 좌측 부탄을 나타낸 것으로 고압측 코일간의 직렬 접속된 상태를 보여주고 있다. 더블팬케이크 코일은 냉각채널(cooling channel)이 설치된 권선 보빈(bobbin)과 코일 부, 층간절연용 스페이서

(spacer)로 이루어져 있고, 그림에 표시된 가, 나, 다 부분으로 절연 구성을 구분할 수 있다.

가. 코일 외측과 직렬접속 단자 간의 고-저압 간 절연

나. 권선 포머 내 측을 통한 코일 내 측간의 고-저압 절연

다. 더블팬케이크 코일 내부의 층 간 절연

절연구성 '가'는 권선 포머의 표면을 따른 연면방전 특성과 액체질소의 절연특성 그리고 '나'는 층간 스페이서, 권선 포머에 대한 연면방전 특성, '다'는 층간 스페이서, 권선 포머에 대한 연면방전 특성에 FRP의 절연파괴 특성에 의해 절연내력이 결정된다. 따라서 액체질소의 절연내력과 액체질소 중 FRP의 연면방전 및 FRP의 절연파괴 특성이 절연설계에 중요한 요소가 된다.

그림 3은 동심배치에서 변압기를 대칭축(axis of symmetry)에서 좌측 부분을 나타낸 것으로 고압측과 저압측의 코일간의 직렬 접속된 상태를 보여 주고 있다. 절연 구성은 교호배치에서 본 것과 같이 가와 나로 부분으로 절연구성을 구분할 수 있다.

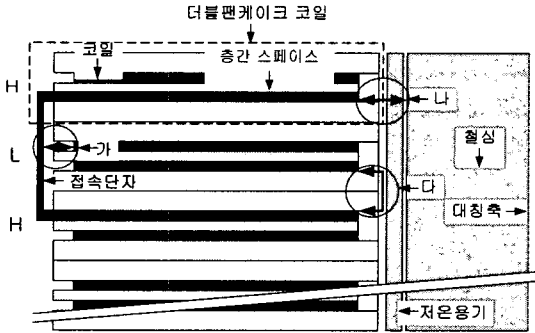


그림 2. 교호배치 고온초전도 변압기의 절연 구조.

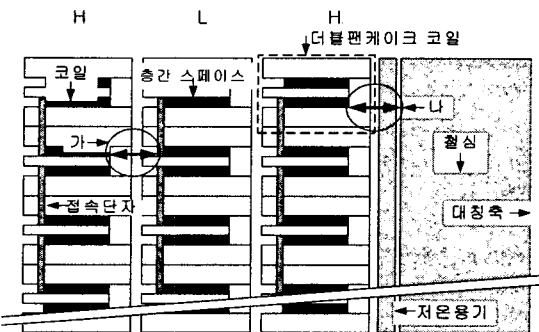


그림 3. 동심배치 고온초전도 변압기의 절연 구조.

3. 변압기 권선 모델 설계 및 제작

3.1 절연 설계 기초 실험

22.9 kV급의 고온초전도변압기의 BIL(basic insulation level)은 Impulse 150 kV, AC 50 kV이다. 따라서 각 절연구성에서는 이에 준한 절연 성능을 가져야 할 것이다.

그림 4는 Impulse 및 AC전압 하에서 액체질소의 절연파괴 특성을 나타낸다. 기기 제작에 사용될 것으로 기대되는 고온초전도 테이프는 모서리 부분이 날카로운 부분을 있으므로 액체질소의 절연 특성 고찰을 위해 침-평판 전극계를 이용하였다. 침의 선단 반경은 25 μm 이고, 선단각은 24 $^\circ$ 이다. 평판전극의 직경은 60 mm이고 침, 평판 모두 SUS 304로 제작된 것이다. 그림 4에서 나타나듯이 전극간격이 증가함에 따라 절연파괴 전압은 증가하고 전극간격 20 mm에서 임펄스 절연파괴 전압이 AC 절연파괴전압의 두 배 정도로 나타났다.

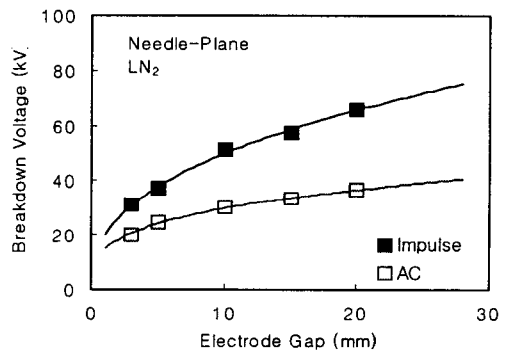


그림 4. FRP의 액체질소 중 절연파괴 특성.

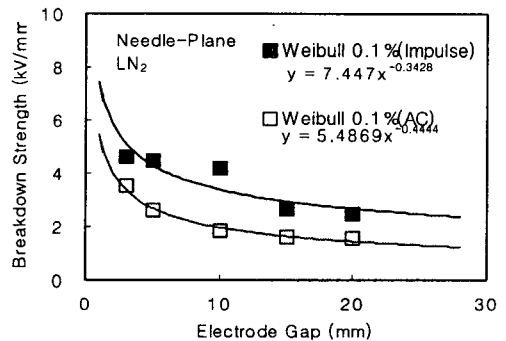


그림 5. 전극 간격에 따른 0.1 % 절연파괴강도.

그림 5에 0.1 % 절연과피 강도를 나타낸다. 그림 4에서 구한 절연과피 전압을 와이블 분포 해석을 통하여 절연설계에 사용할 절연과피 강도를 구하였다.

본 연구에서는 그림 5에 나타냈듯이 액체질소의 절연과피 강도는 impulse 절연과피 전압에서 구한 식 (1)을 이용하여 절연설계를 하였다.

$$E = 7.447g^{-0.3428} \text{ kV/mm} \quad (1)$$

그림 6은 FRP 절연판의 두께에 따른 절연과피 특성을 나타낸다. 극저온에서 기계적 특성 및 전기적 절연 특성이 우수하여 극저온 구조물로서 널리 사용되고 있는 FRP의 절연두께를 0.5, 1, 2 mm로 하였을 경우 구(지름 7 mm)-평판 전극을 이용하여 AC 및 impulse 절연과피시험을 하였다.

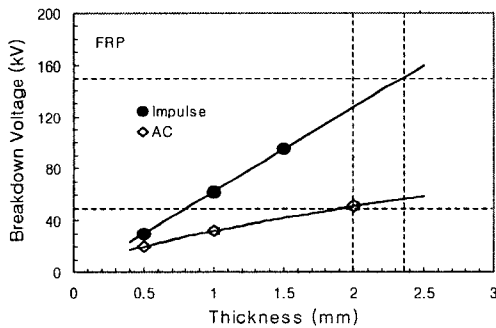


그림 6. 액체질소 중 절연과피 전압의 FRP두께 의존성.

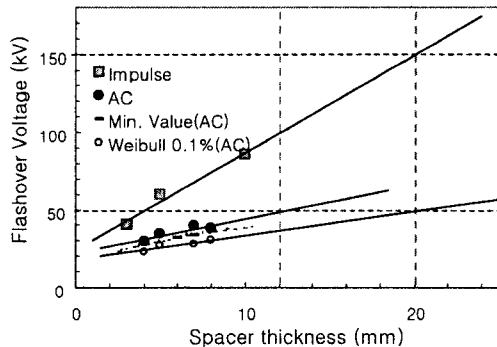


그림 7. 액체질소 중 연면방전 전압의 spacer 두께 의존성.

FRP 두께 2 mm의 경우 AC 절연과피 전압은 약 50 kV이며 Impulse의 경우는 약 120 kV로 2.4 배 정도의 비를 나타낸다. 따라서 FRP의 절연과피 특성은 impulse 절연 특성이 더욱 열악하게 나타나므로 절연설계 시 impulse 절연과피 결과를 기준으로 하여야 할 것이다. Impulse 150 kV 절연시험을 기준시 FRP 절연판은 약 2.4 mm 이상이 되어야 할 것이다.

그림 7은 액체질소 중 FRP 연면방전의 AC 및 impulse 특성을 비교한 그림이다. 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 Ag 테이프(0.25 mm×3 mm)를 사용하여 1회 권선된 코일 두 개를 상, 하부로 배치하고 그 사이에 FRP 막대형 스페이스를 두었을 경우 연면방전 시험을 하였다. 스페이스 두께로서 연면거리를 조절하였다. AC 연면방전의 경우 20회 이상의 시험 데이터를 이용하여 평균값, 최소값 그리고 와이블(weibull) 분포 해석을 하였을 경우 누적과피확률 0.1 %의 값을 나타낸다.

스페이스 두께 약 5 mm일 경우 AC 방전 전압은 약 35 kV이고 impulse 방전전압은 약 60 kV로서 약 1.7배 정도의 비를 가진다. 따라서 연면방전 역시 impulse 환경이 더욱더 열악하게 나타나므로 절연설계시 impulse 절연특성을 기준으로 하여야 할 것이다. Impulse 150 kV 절연시험을 기준시 스페이스 두께는 약 20 mm 이상이 되어야 할 것이다. 그리고 더블팬케이크 내부의 층간 스페이스는 고압의 경우 8단으로 전압이 분담되므로 1/8 수준으로도 적당할 것이다.

또한 그림에서 나타내는 바와 같이 impulse 150kV의 BIL에 있어서 AC 와이블 분포 해석에 의한 누적확률분포 0.1 %의 절연 설계치가 impulse 설계치와 유사하게 나타나고 있어 액체질소의 AC 절연과피 시험을 통해 impulse 절연내력을 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8은 도체 절연특성을 나타낸다. 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 동 테이프(0.3 mm×4 mm)를 전극으로 사용하거나, Kapton 절연지(0.075 mm×10 mm)를 이용하여 10 % overlap 권선법에 따라 3중으로 절연한 동 테이프를 전극으로 사용하였다.

절연내력 150 kV를 기준으로 하였을 경우 두 전극 중 한 전극만을 절연하였을 경우 두 전극 모두 나 도체일 경우에 비해 약 50 kV가 크게 나

타나 약1.3배, 두 도체 모두 절연되었을 경우는 약 1.6배의 절연여유가 생길 것으로 사료된다.

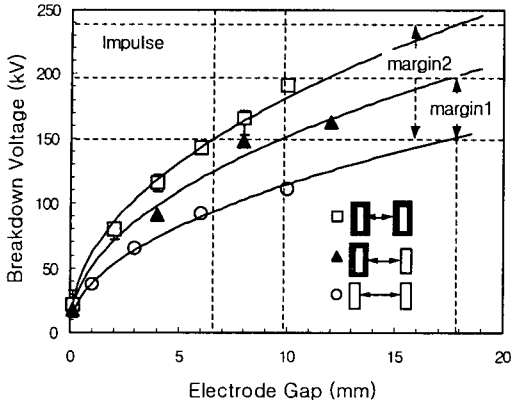


그림 8. 절연 도체의 절연파괴 특성.

3.2 변압기 권선 모델

절연설계를 위한 기초 실험을 통해 impulse 150 kV의 BIL 기준에 대한 표 1과 같은 절연거리 계산 실험식을 구하였다. 실험식을 기준으로 앞서 구분한 절연구성에 대한 절연거리를 계산하고 그림 5와 같이 더블팬케이크 코일을 권선하기 위한 보빈을 설계하였다. 절연물 및 구조물은 모두 극저온 중 절연특성 및 기계적 특성이 우수한 FRP를 사용하였다.

그림 9는 최종적으로 제작된 교호배치 변압기 모델 권선을 보여주고 그림 10은 동심배치 변압기 모델 권선을 보여준다. 그림 9와 10에 나타낸 더블팬케이크 코일은 Kapton 절연지를 이용하여 10% overlap 권선법에 따라 고온초전도 도체와 유사하게 모의 제작된 동 테이프에 3중으로 절연한 도체를 사용하여 4~5kg의 범위에서 인장력을 주어 권선하였으며, 그림 9에 100 m×2(더블)의 150 turns×2(더블)의 교호배치 코일을 나타내고 그림 10에 7 turns×2(더블)의 동심배치 권선을 나타낸다.

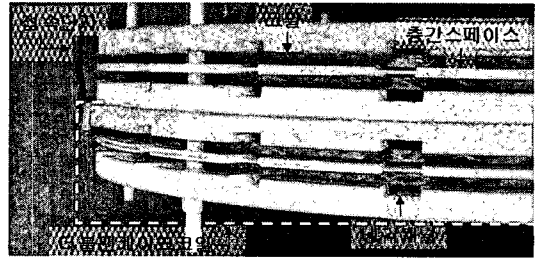


그림 9. 교호배치 변압기 모델 권선.

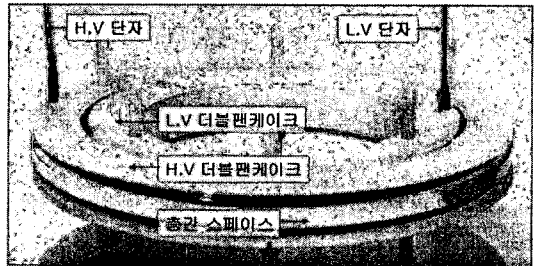


그림 10. 동심배치 변압기 모델 권선.

3.3 절연 평가

고온초전도 응용기기는 초전도 특성을 응용한 새로운 전력기기로서 절연특성을 더불어 기기 성능을 검증하기 위한 시험 방법이 아직 세계적으로 확립되어 있지 않다. 따라서 구조가 유사한 유입 변압기의 절연시험 방법에 준하여 절연 시험을 행하고 있다. 본 연구에서 설계 제작된 변압기 모델 권선은 표 2와 같은 내전압 시험을 행하여 시험결과를 표 3에 나타낸다. 교호배치 모델 변압기 권선은 절연내력시험만 행하였지만 동심배치 모델 변압기 권선은 절연내력시험 후 절연파괴 전압까지 구하였다.

동심배치에서 상용주파 전압을 인가한 경우 92.3 kV에서 절연파괴가 발생하였고, 고압부 코일과 저압부 리드에서 절연파괴가 발생하였다. 뇌임펄스 전압을 인가한 경우 164 kV에서 절연파괴가 발생하였고, 고압부 코일과 저압부 코일에서 절연파괴가 발생하였다.

표 2. 변압기 권선 내전압 시험 규정.

항목	기준
유 도	2.9 kV 1분간
상용주파	50 kV 1분간
뇌임펄스	150 kV(1.2×50 μs) 3회
부분방전	50 pC

표 3. 변압기 모델 권선 내전압 시험 결과.

시험	배치	교호	동심
유도		pass	-
상용주파		pass	pass (BDV=92.3 kV)
임펄스		pass	pass (BDV=164 kV)
부분방전		-	pass (50 pC at 49 kV)

4. 결 론

1MVA, 22.9/6.6kV 고온초전도변압기를 개발하기 위하여 교호 및 동심배치 변압기 모델 권선의 절연을 설계, 제작하여 동일 절연레벨인 유입변압기의 절연시험기준을 적용하여 절연내력을 평가한 결과를 요약하면 다음과 같다.

개념 설계된 권선의 배치가 다른 두 변압기의 구조를 분석하여 절연구성을 명확히 구분하였다. 그리고 절연구성에 따른 액체질소의 절연특성, FRP의 연면특성 및 관통과괴특성 등 절연설계에 필요한 기초절연실험을 통하여 절연데이터를 확보하였다. 이 데이터를 이용하여 22.9 kV급 교호 및 동심배치 미니 모델 변압기를 절연설계 및 제작하여 의 절연거리를 계산하여 각 변압기 모델 권선을 제작하였다. 각 변압기 모델 내전압 시험을 행한 결과 내전압 시험 기준을 통과하였다. 본 연구를 통하여 22.9 kV급 고온초전도 변압기의 절연설계 기초를 완성하였다.

감사의 글

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도응용기술개발 사업단의 연구비 지원에

의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] Osami Tsukamoto, et al, "Overview of R&D activities on application of superconductivity to power apparatus in Japan", Cryogenics 42, pp. 337-344, 2002.
- [2] S.W.Schwenterly, et al, "Development of HTS power transformers for the 21st century: Waukesha Electric Systems/IGC-SuperPower/RG&E/ORNL SPI collaboration", Physica C 382, pp. 1-6, 2002.
- [3] S. H. Kim, W. S. Kim, J. T. Kim, K. D. Choi, H. G. Joo, G. W. Hong, J. H. Han, S. J. Lee, and S. Hahn, "Assembling and Insulation Test of 1MVA Single Phase HTS Transformer for Power Distribution", Journal of the Korea Institute of Applied Superconductivity and Cryogenics, Vol. 5, No. 3, pp. 30-33, 2003.
- [4] Ho-Myung Chang, Yeon Suk Choi, Steven W. Van Sciver, and Thomas L. Baldwin, "Cryogenic Cooling Temperature of HTS Transformers for Compactness and Efficiency", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 13, No. 2, pp. 1478-1481, 2003.
- [5] M. Polak, P. Usak, J. Pitel, L. Jansak, Z. Timoransky, F. Ziz다, H. Piel "Comparison of Solenoidal and Pancake Model Windings for a Superconducting Transformer", IEEE Transactions on Applied Superconductivity, Vol. 11, No. 1, pp. 1478-1481, 2001.