

토로이드형 공심 초전도 변압기의 특성

최 경 달 한 송 업
 서울대학교 전기공학과

CHARACTERISTICS OF A SUPERCONDUCTING AIR-CORE TRANSFORMER OF TOROIDAL SHAPE

Choi Kyeong Dal Hahn Song Yop

Seoul National University, Department of Electrical Engineering

Abstract

With the recent development of high performance AC superconducting wire of very small ac loss and large current carrying capacity, the possibility of superconducting air core transformer is being studied. The air core transformer has merits of no iron loss, no insulation to the core and no harmonics. But the air core transformer has large exciting current and low magnetic coupling factor. To increase the coupling factor, the transformer of toroidal shape is proposed and designed. (10KVA, 110/220 V) Compared with air core transformer of solenoidal shape, the performance is improved. The exciting current occupies about 22% of the rated current.

1. 서론

고자계 대전류에서도 초전도성을 잃지 않는 2중 초전도체가 개발된 이후로 초전도 현상을 전력기에 응용하려는 연구가 활발해졌다. 초전도 변압기의 경우, 움직이는 부분이 없으므로 냉각이 쉽고 구조가 간단하다는 장점이 있음에도 불구하고, 초전도체에 교류가 흐를 때 발생하는 교류손실로 인해 그 개발이 늦어졌지만, 1960년대 초반부터 초전도 변압기에 대한 연구^{1), 2)}가 시작되었고 1981년 미국 웨스팅하우스의 10KVA급 초전도 변압기 개념설계³⁾를 바탕으로 여러 나라에서 이에 대한 연구결과가 나오기 시작했다. 4), 5), 6) 웨스팅 하우스를 비롯한 다른 연구에서 발표된 초전도 변압기는 그 기본구조가 일반 변압기와 비슷하고 단락사고시 발생할 수 있는 팬치에 대비하여 보조권선을 둔 형태가 일반적이었다. 60년대 초반 철심이 없는 공심 초전도 변압기에 대한 연구가 있었으나, 교류손실과 권선수가 많아지는 데 따른 부피의 증가로 인하여 실현 가능성에 대

해 부정적이었다. 그러나 최근 교류용 초전도선의 개발로 공심 초전도 변압기에 대한 연구가 다시 시도되고 있다. 7) 변압기에 철심이 없게 되면 우선 전체 중량을 크게 줄일 수 있고 철심의 비선형 특성으로 생기는 전류파형의 이치러짐이 없어지는 등 여러가지 성능 향상을 기대할 수 있다. 그러나 최고자속수를 높이기 위해 권선을 많이 감아야 하며, 따라서 부피가 커지게 된다. 초전도선에서 발생하는 교류손실은 사용된 초전도체의 양에 비례하므로 권선수는 제약을 받게 된다. 또한 공심변압기에서는 1차 권선과 2차 권선사이의 자기 결합계수가 작아 전압변동율이 크다. 본 논문에서는 변압기의 자기결합계수를 높이기 위해 토로이드형 공심 초전도 변압기를 제안하였으며, 변압기 회로의 특성 해석과 이 해석을 바탕으로 10KVA급(110V/220V) 변압기를 개념 설계하였다.

2. 토로이드형 공심 초전도 변압기의 회로해석

그림 1.은 토로이드형 공심 초전도 변압기의 외형도와 단면도이다. 1차측 권선은 바깥쪽에 2차측 권선은 안쪽에 두었으며, 철심이 없으므로 히스테리시스손, 와전류손과 같은 철손이 없다. 또 4.2K에서 초전도선의 손실도 무시할 수 있을 정도로 작으므로 권선의 저항성분을 무시하여 변압기의 해석회로를 그림 2.와 같이 놓을 수 있다.

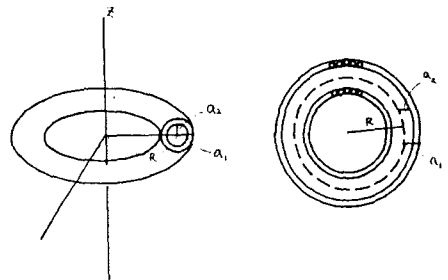


그림 1. 토로이드형 공심 초전도 변압기

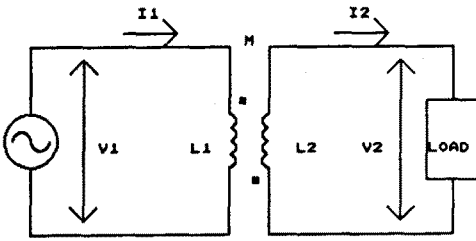


그림 2. 공심초전도 변압기의 해석회로

V_1, I_1, V_2, I_2 는 각각 1차측 전압, 전류 · 2차측 전압, 전류를 나타내며 L_1, L_2 는 1차측과 2차측 권선의 자기 인덕턴스, M 은 두 코일사이의 상호 인덕턴스를 나타낸다. 여기서 1차측과 2차측 전압, 전류의 관계는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} V_1 &= j\omega L_1 I_1 + j\omega M I_2 \\ V_2 &= j\omega L_2 I_2 + j\omega M I_1 \end{aligned} \quad (1)$$

V_2 를 V_1 과 I_2 로 나타내면

$$V_2 = \frac{M}{L_1} V_1 + j\omega \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1} I_2 \quad (2)$$

식 (2)에서 알 수 있듯이 공심 변압기의 전압·전류비는 권선비보다는 인덕턴스비에 좌우되므로 먼저 토로이드형 코일의 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 구하여 본다. 그림 3.과 같은 토로이드의 경우, 자속밀도는 원통 좌표계에서

$$\begin{aligned} \vec{B} &= \frac{\mu_0 N I}{2\pi r} \hat{\phi} \quad (\text{토로이드 내부}) \\ &= 0 \quad (\text{토로이드 외부}) \end{aligned} \quad (3)$$

로 주어진다. 자속 ϕ 는

$$\begin{aligned} \phi &= \int_a^R \vec{B} \cdot d\vec{a} \\ &= \frac{\mu_0 N I}{2\pi} \int_{-a}^a \{ \ln(R + \sqrt{a^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a^2 - z^2}) \} dz \quad (4) \end{aligned}$$

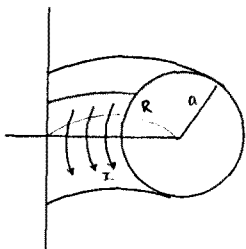


그림 3. 토로이드형 코일

인덕턴스 L 은

$$\begin{aligned} L &= \frac{N\phi}{I} \\ &= \frac{\mu_0 N^2}{2\pi} \int_{-a}^a \{ \ln(R + \sqrt{a^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a^2 - z^2}) \} dz \quad [H] \quad (5) \end{aligned}$$

이 값은 근사적으로

$$L = 1.257 N^2 (R - \sqrt{R^2 - a^2}) \quad [\mu H] \quad (6)$$

로 쓸 수 있다. 그림 1.의 1차 코일과 2차 코일을 쇠고하는 자속은 식 (7) - (10)과 같다.

$$\phi_{11} = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{2\pi} \int_{-a_1}^{a_1} \{ \ln(R + \sqrt{a_1^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_1^2 - z^2}) \} dz \quad (7)$$

$$\phi_{22} = \frac{\mu_0 N_2 I_2}{2\pi} \int_{-a_2}^{a_2} \{ \ln(R + \sqrt{a_2^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_2^2 - z^2}) \} dz \quad (8)$$

$$\phi_{12} = \frac{\mu_0 N_2 I_2}{2\pi} \int_{-a_1}^{a_1} \{ \ln(R + \sqrt{a_2^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_2^2 - z^2}) \} dz \quad (9)$$

$$\phi_{21} = \frac{\mu_0 N_1 I_1}{2\pi} \int_{-a_2}^{a_2} \{ \ln(R + \sqrt{a_1^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_1^2 - z^2}) \} dz \quad (10)$$

ϕ_{11} : 1차 코일 자신에 의해 발생된 자속

ϕ_{22} : 2차 코일 자신에 의해 발생된 자속

ϕ_{12} : 2차 코일에서 발생된 자속중 1차 코일을 쇠고하는 자속

ϕ_{21} : 1차 코일에서 발생된 자속중 2차 코일을 쇠고하는 자속

또한 자기 인덕턴스 L_{11}, L_{22} 와 상호 인덕턴스 L_{12}, L_{21} 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} L_{11} &= \frac{N_1 \phi_{11}}{I_1} \\ &= \frac{\mu_0 N_1^2}{2\pi} \int_{-a_1}^{a_1} \{ \ln(R + \sqrt{a_1^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_1^2 - z^2}) \} dz \quad (11) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{22} &= \frac{N_2 \phi_{22}}{I_2} \\ &= \frac{\mu_0 N_2^2}{2\pi} \int_{-a_2}^{a_2} \{ \ln(R + \sqrt{a_2^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_2^2 - z^2}) \} dz \quad (12) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} L_{12} &= \frac{N_1 \phi_{12}}{I_2} \\ &= \frac{\mu_0 N_1 N_2}{2\pi} \int_{-a_1}^{a_1} \{ \ln(R + \sqrt{a_2^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_2^2 - z^2}) \} dz \quad (13) \end{aligned}$$

$$L_{21} = \frac{N_2 \phi_{21}}{I_1} = \frac{\mu_0 N_1 N_2}{2\pi} \int_{-a_2}^{a_2} \left(\ln(R + \sqrt{a_1^2 - z^2}) - \ln(R - \sqrt{a_1^2 - z^2}) \right) dz \quad (14)$$

따라서 식(2)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$V_2 = \frac{L_{12}}{L_{11}} V_1 + j\omega \left(\frac{L_{11}L_{22} - L_{12}^2}{L_{11}} \right) I_2 \quad (15)$$

3. 토로이드형 공심 초전도 변압기의 개념설계

2절의 회로 해석을 바탕으로 10KVA급 공심 초전도 변압기를 설계하여 본다. 공심 변압기는 철심이 없으므로 여자 전류가 일반 변압기의 수십배정도까지 흐를 수 있다. 따라서 무부하시의 변압기 인덕턴스를 크게 하기 위해 권선수를 최대한 늘려야 한다. 그러나 초전도선에서 발생하는 교류 손실은 부피에 비례하므로 권선수를 결정할 때에 이점을 고려하여야 한다. 변압기는 1차 전압 110V, 2차 전압 220V로 하며 권선수는 1차 3000회, 2차 6500회로 하였다. 권선의 치수는 그림 4.와 같다.

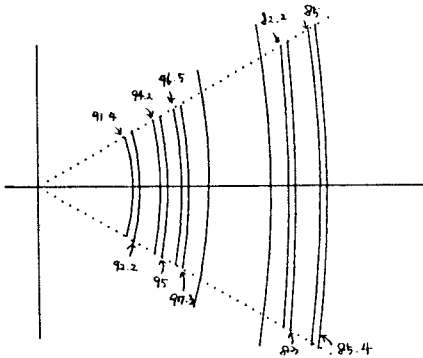


그림 4. 10KVA 공심 초전도 변압기

설계에 참조한 초전도선의 특성은 표 1.과 같다.

표 1. 초전도선의 제원

케이블	단위 소선수 : 7
	직 경 : 0.38mm 트위스트 피치 : 3.05mm
소 선	직 경 : 0.103mm
	트위스트 피치 : 0.98mm
	필라멘트 직경 : 0.444 μ m 필라멘트 수 : 15367

내직경 r_1 은 1차 권선을 2층으로 하여 감을 수 있는 정도의

원주 길이로부터 구하였고, 외직경 r_2 는 2차 권선을 2층으로 감을 수 있도록 정하였다. 권선을 감기 위한 권선틀은 액체 헬륨에 담가도 변형되지 않는 비자성체로 하여야 한다. 식 (6)을 이용하여 1차측과 2차측 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스를 구하였고 그 값을 표 2.에 나타내었다.

표 2. 설계변압기 인덕턴스

R	139.18mm
a_1	46.7 mm
a_2	43.42mm
L_1	91.27mH
L_2	368.5 mH
M	181.5 mH

식 (2)에서 알 수 있듯이 1차 전압과 2차 전압의 비는 권선 비보다는 인덕턴스의 비로 된다. 따라서 설계된 변압기에 서는

$$V_2 = 1.99 V_1 + j 0.454 I_2$$

가 되며 전압변동율은 9.4%정도로 계산된다. 또한 여자전류는 정격전류의 22%정도가 된다.

4. 결론

교류용 초전도선 출현이후 가속되어온 초전도 변압기 연구는 이제 초전도선이 전류밀도가 큰 점을 이용하여 공심 초전도 변압기를 개발하게 되었다. 공심 변압기는

- (1) 히스테리시스 손과 와전류 손 등의 철손이 없으며
 - (2) 철심의 비선형 특성으로 생기는 전류파형의 이치러짐이 없고
 - (3) 전체 무게를 크게 줄일 수 있으며, 아울러 철심에 대한 절연을 고려할 필요가 없다.
- 또한 공심 초전도 변압기의 특징으로 다음 사항을 들 수 있다.

- (1) 일반 변압기와 달리 1차, 2차 전압비와 전류비가 권선비보다는 각 권선의 인덕턴스 비에 의해 결정된다.
- (2) 자기결합계수가 일반 변압기보다 작아 부하전류의 변화에 2차 전압이 영향을 받는다.
- (3) 여자전류가 일반변압기보다 몇배 이상 흐를 수 있다. 또 여자전류가 크므로 1차 전류와 2차 전류사이 에 위상 차이가 생긴다. 여자전류를 줄이기 위해서는 변압기 1차측 임피던스를 크게 하여야 하며, 이렇게 할 경우 권선수가 늘 어나고 부피도 더 커지게 된다. 초전도 변압기의 경우, 임피던스의 증가와 교류손실의 증가를 같이 고려하여야 한다.

(4) 초전도 변압기는 부하가 커짐에 따라 권선 전류가 증가하여 임계전류를 넘어서면 퀘치가 발생한다. 변압기는 마그네틱과 달리 권선에 저장되는 자기에너지가 적으므로 퀘치가 일어났을 때 발생하는 열탕은 상대적으로 작으나 이에 대한 보호책을 마련하여야 한다.

본 논문에서는 누설자속을 줄이고 자기결합계수를 높이기 위해 토로이드형 공심 초전도 변압기를 제안하여 그 회로특성을 해석하였으며 10KVA급 변압기를 기념설계하였다. 솔레노이드형 공심 변압기와 비교하였을 때 성능이 향상됨을 알 수 있다. 그러나 공심 변압기의 전반적인 문제점을 해결하기 위해서는 교류손실이 대폭 감소된 교류용 초전도선의 개발이 선행되어야 한다.

참고문헌

1. P. A. Klaudy, "Some Experiments Relating to the Layout of Superconducting Transformers," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 9, K. D. Timmerhaus, Ed., Plenum Press, New York, 1964, pp. 349 - 359
2. H. O. Lorch, "The Feasibility of Superconducting Power Transformers," *Cryogenics*, Vol. 9, October 1969, pp. 354 - 361
3. H. Riemersma et al., "Application of Superconducting Technology to Power Transformers," *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-100, No. 7, July 1981, pp. 3398 - 3405
4. J. H. Murphy, "Experimental Investigation of the Current Distribution Characteristics of a Superconducting Transformer," *Advances in Cryogenic Engineering*, Vol. 27, 1970, pp. 73 - 80
5. F. van Overbeek et al., "Design and Operation of a Protection System for Transformers with Superconducting Windings," *Cryogenics*, Vol. 25, December 1985, pp. 687 - 694
6. 岩瀬 成卓 외, "72KVA 四巻線構造超電導變壓器の試作," *일본 저온공학*, Vol. 22, No. 6, 1987, pp. 354 - 361
7. 石郷岡 猛 외, "超電導空心單巻變壓器の試作とその基本特性," *일본 전기학회 논문지*, Vol. 111-B, No. 4, 1991, pp. 448 - 453
8. F. W. Grover, "Inductance Calculations," D. VAN NOSTRAND COMPANY, INC., New York, 1946, p 170