

실계통 운전경험에 따른 아몰퍼스 변압기의 제조 및 운영방안

정영호
전력연구원

Manufacturing and operation experiance of Amorphous Alloy Core Transformer

Yeong-ho Jeong
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - Some recomendations for the manufacturing, operation and maintanance of amorphous alloy core transformer are presented through the operation experiance. Transformers on trouble was taken to pieces and tested from a viewpoint of durability, and low loss characteristics.

1. 서 론

아몰퍼스(amorphous) 변압기는 비정질 자성재료를 변압기 철심으로 사용하므로써 무부하손실이 기존의 변압기에 비하여 1/3-1/4 정도에 지나지 않는 저손실 변압기이다. 비정질 철심재료는 Fe, Si, B를 주성분으로 하는 합금으로서, 이를 용융상태에서 급냉시켜 금속으로서의 결정구조를 가지지 않는 비정질 상태로 만들어 주므로써 우수한 저손실 특성을 갖게된다. 비정질 철심의 이러한 저손실 특성으로 인하여 1980년대 초부터 미국, 일본을 중심으로 비정질 자성재료를 전력용 변압기에 적용하기 위한 연구가 활발히 진행되어 외국의 여러 변압기 제작사가 양산체제를 갖추게 되었다. 미국의 경우 아몰퍼스 변압기가 신규시장의 7%(1995년 기준)를 점하고 있으며, 에너지 절약정책, Green Round등의 영향으로 점유비율이 점점 확대되어 갈 것으로 전망된다. 한편 국내의 아몰퍼스 변압기 개발은 1984년 한전 전력연구원과 효성중공업의 공동연구로 시작되었다. 1986년 20KVA 아몰퍼스 변압기 6대를 시제작하였으며, 1990년 한전 전력연구원에서는 20, 30, 50KVA 아몰퍼스 변압기를 각 6대씩 총 18대를 시제작하여 실계통 실증시험 및 경년열화 특성시험을 위해 사용한 바 있고, 1997년 부터는 한전에서 일정량의 아몰퍼스 변압기를 국내 업체들로부터 구매하고 있다.

한편 아몰퍼스 변압기는 손실특성이 좋은 반면 기존 변압기에 비하여 제조와 운용상 여러 가지 불리한 점을 가지고 있다. 비정질 철심은 포화자속밀도와 점적율이 낮으므로 변압기의 부피와 무게가 증가하게 되고, 자왜가 철심의 10배 정도가 되어 변압기의 소음을 커지게 한다. 또한 가격이 규소강판 철심보다 비싼 물론, 소둔후에는 비정질 철심이 부스러지기 쉽고, 자기특성이 응력에 민감하게 반응하여 변화하므로 가공과 취급에 특별히 유의하여야 한다. 여기서는 아몰퍼스 변압기의 실계통 실증시험 운전경험과 고장변압기의 분석자료를 토대로 이 변압기의 제조 및 배전계통에 확대 사용시 고려할 사항을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 아몰퍼스 변압기의 제조 및 특성

아몰퍼스 변압기의 제조공정은 철심의 제작공정 외에는 기존의 주상변압기와 동일하다. 비정질 합금 리본을 권취하고 절단한후 재적층 및 성형을 하고 소둔을 한후 조립을 하게된다. 소둔은 급냉제도시 발생한 잔류응력과, 철심을 소정의 형태로 winding할 때 받은 응력을 제거하기 위하여 큐리온도이하에서 자장중 열처리를 하게된다. 변압기 제조와 운용 측면에서 특별히 주목하여야 할 비정질 철심재료의 기계적 특성은 비정질 리본의 두께와 경도이다. 표 1에 나타난 것처럼 기존의 철심재료인 규소강판과 비교하여 두께가 1/10 정도로 매우 얇고, 경도가 4.2배 가량 커서 높은 가공처리 기술을 요하며 열처리 후에는 부스러지기 쉽게 된다. Bending Test를 하는 경우 열처리전에는 반경 1.0mm에서도 파손되지 않으나 열처리 후에는 반경 3.5mm에서도 파손되어 버린 예가 있다 [6]. 또한가자 비정질 철심에서 주의를 기울여야 하는 것중 하나는 비정질 철심재료가 기계적 응력에 매우 민감해서, 조립과정에서 철심이 받은 응력으로 인하여 철손 및 여자전류가 증가되는 등의 자기특성이 저하된다는 점이다. 표 2는 1896년 시제작 변압기의 조립과정중의 철손 변화이다. [5]

표 1 비정질 철심재료의 특성

항 목	아몰퍼스 재료	규소강판 (Z-6H)	비 고
철손(W/kg)	0.21	0.9	1.4 T/60HZ
포화 자속밀도(T)	1.55	2.03	25℃/100℃
여자VA(VA/Kg)	0.37	0.94	
점적율(%)	75	97	
경도(Hv)	900	210	
두께(mm)	0.03	0.3	
큐리온도(℃)	414	746	

표 2 아몰퍼스 변압기 조립과정중의 철손(watt)변화

단 계 별	1호기	2호기	3호기	4호기	5호기	평균
조 립 전	12.8	12.7	12.7	13.0	12.8	12.7
철심 조립후	14.1	14.5	13.8	14.3	13.2	13.9
총 조립후	17	16.8	16.4	14.8	13.6	15.5

2.2 아몰퍼스 변압기의 실부하 운전

1986년 Non-cutting Core 방식으로 제작된 6대의 변압기중 실부하 운전에서 사용된 3대의 변압기는 부하공급 장소가 없어진 경우를 제외하고는 1986년부터 최근까지 정상적으로 운전되고 있다. 1990년 제작되어 22.9kV 배전선로에서 실부하 운전중인 Cut-Core 방식의 변압기 16대 역시 고장으로 사용이 중지된 경우를 제외하고는 아몰퍼스 변압기 이어서 실부하 운전에서 지장이 있는 경우는 아직까지 없었다. 실부하 운전중이던 변압기중 몇대는 어떤 원인에 의하여 고장을 일으켜 운전

을 중지하였다. 그러나 운전중인 변압기의 보호장치는 기존 변압기의 그것과 동일하여 COS 및 퓨즈링크로 구성되는 선로 1차측 보호장치, 캐쉬와 캐쉬홀더로 구성되는 선로 2차측 보호장치로 구성되어 있어, 써지나 과부하, 단락 등에 대하여 보호장치로서의 역할이 충분했다고 할 수는 없다. 따라서 향후 제작되는 아몰퍼스 변압기는 외부의 전기적, 열적 고장요인으로부터 충분히 보호될 수 있는 장치를 구비하여 내용연수 까지 고장없이 운전되도록 하는 것이 바람직하다고 생각된다.

1990년 시제작된 아몰퍼스 변압기는 기존 변압기와 동일한 외형으로 제작되었고, "아몰퍼스 변압기"라는 글자 떠만을 변압기 외함에 부착했고, 이 글자가 지워진 경우에는 부하변동이 잦은 배전계통의 특성상 기존 변압기와 별도관리가 매우 어려웠다.

2.3 고장 변압기의 시험분석

실부하 운전중 고장으로 사용을 중지한 아몰퍼스 변압기를 시료로 사용하여 육안점검, 해체점검, 철손측정, 여자전류 측정, 철심의 펼침 및 재접침에 따른 철심의 재사용 가능성 조사 등을 실시하므로써 고장 원인분석과 대책을 제시하고, 철심의 재사용 가능성을 검토하였으며, 철심의 손실특성 변화 여부를 측정, 분석 하였다.

2.3.1 시료 변압기의 육안 관찰

시료변압기의 내역은 표 3과 같으며, 철심과 1,2차권선으로 구성되는 몸체를 외함으로부터 들어내고, 육안관찰을 실시하였다. 절연유로 채워진 외함 내부 바닥에는 수cm 크기의 비정질 철심 리본 부스러기가 상당량 발견되었다. 시료 1의 경우는 육안으로는 특이한 사항을 발견할 수 없었다. 시료 2의 경우는 1차 권선을 감싸고 있는 절연지 일부가 찢어지고 1차권선이 한쪽으로 몰려 있었다. 3단으로 분할되어 구성된 철심은 각 1개 마다 접침부의 결합상태가 약간씩 상이하였고, 그중 1개는 접침부 양단의 결합상태가 비정상적으로 벌어져 있었다. 시료 3의 경우는 철심부의 형태를 유지하고 외함에 고정시켜주는 철심 지지구조물의 형태가 변형되어 있었다. 그림 1은 시료 2의 비정질 철심의 상태이다.

표 3 시료 변압기의 내역

시료번호	용 량	제작년월	운전기간	특이사항
1	30kVA	'90. 5	3년 6월	없 음
2	50kVA	'90. 5	1년 8월	절연지 일부 파열 1차권선 몰려있음
3	50kVA	'90. 5	2년 7월	철심 지지구조물 변형

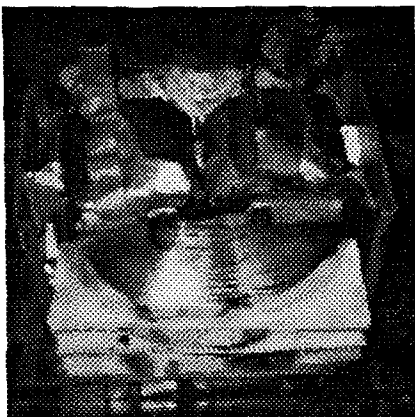


그림 1 시료2의 비정질 철심의 상태

2.3.2 절연, 철손, 여자전류 측정

Digital Multimeter를 사용하여 절연저항과 전압비 측정을 실시하여 고장원인을 추정하였으며, Power Meter를 이용하여 철손을 측정하였다. 표 4에 측정 결과를 나타낸다.

표 4 철손, 여자전류, 절연저항 측정 결과

시료번호	구 분	제작시 값	변화된 값	비 고
1	철손 watt	25.0	25.2	2차권선
	여자전류 A	0.41	1.49	이용 측정
2	철손 watt	50.0	136.0	2차권선
	여자전류 A	0.79	13.12	이용 측정
3	철손 watt	32.0	45.0	철심교정후
	여자전류 A	측정안함	측정안함	철손 측정

2.3.3 철심의 펼침 및 재접침 시험

고장 변압기의 수리는 중수리와 간이수리로 구분된다. 중수리란 권선이 단선 또는 단락되어 재권선을 하는 수리이고, 재권선을 요하지 않는 수리가 간이수리이다.

재권선을 하기 위해서는 철심을 분리한후 새로운 권선을 삽입하여야 한다. 시료로 사용한 아몰퍼스 변압기의 경우에도 중수리가 가능할지를 알아보기 위하여 철심의 접침부를 분리한후 다시 접쳐보았다. 이 작업은 시료 2 변압기를 대상으로 실시하였는데, 철심은 2inch폭의 3단으로 구성되어 있었다. 아몰퍼스 철심의 리본 1장당 두께는 매우 얇고, 리본표면에는 절연유가 도포되어 있어 재접침 작업을 하는중에 접침부위가 이완되거나 풀어져 한번 풀어진 철심을 다시 접치는 것은 많은 시간을 요하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 고장원인 분석 및 대책

1번 시료의 경우 외부 써지 등에 의하여 1차 권선이 단선된 것으로 판단되며 이 경우는 기존 변압기에서도 흔히 일어나는 고장이다. 아몰퍼스 변압기 이기 때문에 관심을 갖게되는 고장은 2번과 3번 시료의 경우이다. 2번 시료의 경우 2차 권선이 단락되어 있었으며, 이는 단락전류에 의한 전자력에 의하여 1, 2차 권선에 이상이 발생하고 1차 권선이 한쪽으로 몰리는 현상이 발생한 것으로 여겨진다. 3번 시료의 경우는 점검시 권선에 이상은 없었으나 운전당시에는 순간적인 내부단락으로 이상이 발생하여 사용을 중단한 것으로서, 절연저항값은 정상이었지만 철심 지지구조물에 변형이 생긴 것으로 보아 순간적인 단락전류가 흘렀다가 곧바로 고장원인이 제거되었을 것으로 생각된다. 시료의 외함 바닥에서 발견된 아몰퍼스 코어 부스러기에 2번과 3번 시료의 근본적 고장원인이 있을 수도 있다고 생각된다. 표 1에서 알 수 있는 바와 같이 아몰퍼스 합금은 두께가 매우 얇고 경도가 커서 잘 부스러질 수 있으며, 변압기의 제작과정이나 사용중 철심 접침부의 전자기적인 지속적 진동, 써지와 같은 전기적 충격, 취급과정에서의 기계적인 충격으로 철심 부스러기가 발생하고 이것이 절연유 내에서 유동하다가 내부 단락을 일으켰을 것으로 추정된다.

이러한 고장을 방지하기 위해서는 제조와 취급과정에서 다음과 같은 조치가 필요하다고 생각된다.

첫째, 과부하, 단락전류, 써지, 뇌격 등으로부터 변압기를 충분히 보호할 수 있도록 1, 2차 측에 보호장치를 구비하여야 한다.

둘째, 철심의 표면을 규소강판과 델라민 수지등을 이용하여 감싸서 변압기의 제조, 사용, 취급과정에서 아몰퍼스 합금 부스러기가 발생하지 않도록 하여야 한다.

3.2 아몰퍼스 철심의 무부하 손실 특성 평가

1차 권선이 단선된 1번 시료변압기의 경우는 철손값이 초기치와 큰 변화가 없었으나, 2차 권선이 단락된 2번 시료 철심의 경우는 제조시의 50W에서 136W로 무려 172%가 증가하였다. 이는 변압기 사용중에 가해진 전기적, 기계적 충격에 의해서 철심 접침부가 벌어지고 이에 따라 자기회로 저항이 증가하였으며, 변압기의 운전 및 취급과정에서 가해진 진동에 의한 철심의 부분적 손상, 비정질 철심에 가해진 응력의 변화 등이 원인이라고 생각해볼 수 있는데, 이러한 원인이 복합적으로 작용하여 철손이 크게 증가되었다고 판단된다. 3번 시료 변압기의 경우는 육안 관찰시 발견된 철심지지구조물의 변형을 바로잡고 철손을 측정하였는데 제조당시와 비교하여 40%정도가 증가하였다. 이는 표 2에 나타낸 것처럼, 비정질 철심 재료가 기계적 응력에 매우 민감하기 때문에 철심에 가해진 응력의 증가로 무부하손실 및 여자전류가 증가 되었다고 생각된다. 따라서 아몰퍼스 변압기가 저손실 특성을 지속적으로 유지하기 위해서는 다음과 같은 점이 고려되어 제조되어야 할 것으로 생각된다.

첫째, cut-core 방식의 철심을 갖는 아몰퍼스 변압기는 사용중 철심의 접침부분이 풀어지지 않는 구조로 제작되어야 한다.

둘째, 변압기의 제작, 운반, 설치, 운전중에 아몰퍼스 철심을 효과적으로 지탱해주기 위하여 clamping을 해주게 되는데, 이때 가해지는 응력이 철심의 자기적 특성에 큰 영향을 미치므로 철심부를 효과적으로 고정시켜주는 구조로 만들어져야 한다.

3.3 아몰퍼스 변압기의 수리후 재사용 가능성 검토

기존의 규소강판 변압기의 경우 중수리가 요구될 때 철심을 재사용하여 권선을 하게되나, 아몰퍼스 변압기의 경우는 아몰퍼스 리본의 두께가 얇고, 매우 많은 매수를 적층해서 철심을 만들게 되므로 철심을 펼쳤다 접치는 일은 작업성이 매우 떨어진다. 또한 이러한 작업과정에서 철심이 부분적으로 부스러지거나 특성이 열화될 수 있으므로 철심을 재사용하는 중수리는 바람직하지 않다고 생각된다. 따라서 변압기 제작자는 처음 제작시부터 이를 고려하여 구조적으로 안정된 제품을 만들어야 할 것이며, 변압기 사용자는 아몰퍼스 변압기에 이상이 생겨 중수리품으로 분리된 경우는 경제성을 평가하여 수리 재사용 여부를 결정해야 할 것으로 생각된다.

3. 결 론

국내에서 시제작 된 아몰퍼스 변압기를 22.9kV 배전선로에서 실부하운전을 한 경험과 고장으로 사용을 중지한 변압기를 시험분석한 결과 아몰퍼스 변압기의 제조와 운영에 관한 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 아몰퍼스 변압기의 내부에서 비정질 철심재료 리본 부스러기가 발생되면 이것의 유동으로 인해서 절연과파, 단락고장 등의 가능성이 있으므로, 비정질 철심의 표면을 구조적으로 충분히 감싸서 제작하여, 변압기의 제조, 사용, 취급과정에서 비정질 리본의 부스러기가 생기지 않도록 하여야 한다.

2) 철심지지구조물 변형을 바로잡은 간이수리 변압기의 무부하손은 변압기 제작시의 값과 비교하여 약 20% 증가하였으며, 이것은 수리과정에서 아몰퍼스 철심에 가해진 응력의 변화때문으로 생각된다.

3) 2차 권선이 단락된 2번 시료변압기의 무부하손은 제조시의 50W에서 136W로 172%가 증가하였는데 이는 변압기 사용중에 가해진 전기적, 기계적 충격에 의한 철심 접침부 벌어짐 및 이에 따른 자기회로 저항의 증가, 변압기의 운전 및 취급과정에서 가해진 진동에 의한 철심의 부분적 손상, 철심에 가해진 응력의 변화 등

이 복합적으로 작용하였기 때문으로 판단된다.

4) 아몰퍼스 변압기가 내용년수까지 저손실특성을 유지한 상태로 운전되기 위해서는 현재 사용되는 1차측 보호장치인 COS 및 퓨즈링크, 2차측 보호장치인 캐치 및 캐치홀더 외에 충분한 자체 보호장치를 구비하여 과부하, 썬지, 뇌격등의 전기적, 열적 손상 및 기계적 충격으로부터 보호될 수 있도록 하여야 한다.

5) 변압기 고장시 재권선을 요하지 않으며 철심부를 변형하지 않는 간이수리는 실시할 수 있겠으나, 재권선을 해야하는 중수리는 작업성, 철심의 자기특성 유지의 측면에서 경제성이 입증되지 않는 한 바람직하지 않다.

6) 아몰퍼스 변압기의 저손실 특성을 변압기 내용년수까지 유지하고 철심 부스러기 발생과 같은 이상상태의 조기발견을 위해서는 활성상태에서 변압기의 전반적인 상태를 진단할 수 있는 방안이 강구되어야 한다.

7) 부하변동이 잦은 배전계통의 특성상, 아몰퍼스 변압기를 기존 변압기와 용이하게 구별하고, 별도로 관리하기 위해서는 "Amorphous Metal" 등 명판에 문자로 기재하는 외에 변압기의 외형이나 색상을 달리하는 등의 방안이 마련되어야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] Harry W. Ng, Ryuske Hasegawa et al., "Amorphous Alloy Core Distribution Transformers", Proceedings of the IEEE, Vol.79, No.11, p1068, 1991
- [2] M. Ichikawa et al., "아몰퍼스 변압기의 성능평가" CRIEPI Research Report, W90025, 1990
- [3] T. Okamoto et al., "배전기자체 신기술" CRIEPI Research Report, Yokosuka Research Lab., W08, 1991
- [4] 민복기, 송재성, 정영호, 임정재, "부하반환법에 의한 20kVA 비정질 변압기의 경년열화 연구", 전기학회 논문지, 제43권, 2호, p278, 1994
- [5] 김윤동, 백예현의 "아몰퍼스 코어를 이용한 저손실형 변압기 개발 유도", 한전 기술연구원 연구보고서, KRC-84S-T13, 1986
- [6] 김윤동, 강원구의 "아몰퍼스 코어소재 국산화 및 변압기 설계 최적화에 관한 연구", 한전 기술연구원 연구보고서(1), KRC-87D-J08, 1989