

식물성절연유를 사용한 친환경 주상변압기의 절연 특성 연구

곽동순, 최재형, 민치현, 박대수, 김상현
경상대학교 전기공학과

Study on Dielectric Characteristics of the Environmental-friendly Pole Transformer using Vegetable Oil

Dong-Soon Kwag, Jae-Hyeong Choi, Chi-Hyun Min, Tae-Soo Park, Sang-Hyun Kim
Dept. of Electrical Engineering, Gyeongsang National University

Abstract - In recent years, environmental concerns have been raised on the use of poorly biodegradable fluids in electrical apparatus in regions where spills from leaks and equipment failure could contaminate the surroundings. For development of the environmental-friendly pole transformer using vegetable oil, we discussed the insulation construction of the transformer and the dielectric characteristics of the Nomex insulation paper in vegetable oil. Based on the experimental data, the insulation of the transformer is designed.

1. 서 론

최근 들어 전기전력에 대한 경제성의 향상 및 기기의 소형 경량화에 대한 요구와 더불어 사회 환경을 고려해야 된다는 의식이 높아지고 있으며, 전 세계적으로 전력기기의 친환경 제품 개발이 의무화 되어가고 있다. 국내에서도 2005년 7월 '친환경상품 구매촉진 법률' 발표로 인해 친환경 변압기 개발이 확대되고 있는 추세이다. 따라서 제품 단가뿐만 아니라 친환경적 요소도 제품 경쟁력에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 유입변압기는 본체 내부에 냉각 및 절연용도의 절연유가 주입되는 방식으로 종래에는 팜유나 광유의 단점인 낮은 인화점을 개선한 실리콘유를 주로 사용하였으나, 이들 절연유는 공업유이기 때문에 본체의 결함이나 변압기의 폐기로 인하여 외부로 누출될 경우 심각한 환경오염을 야기한다는 문제점이 있었다. 따라서 유입변압기에서도 기존의 팜유를 대체할 수 있는 새로운 식물성절연유에 대한 연구 개발이 활발히 진행되어 실제로 적용이 되고 있으며, 뛰어난 생분해성, 우수한 절연특성 및 고갈 걱정이 없고 안정적 공급 가능 등의 장점을 살려 그 우수성을 인정받고 있다. 그러나 식물성절연유의 경우 점도가 기존 팜유에 비해 높기 때문에 자연대류 현상을 이용한 주상변압기의 내부온도 상승 원인이 되고, 그 결과 종래의 절연재 및 절연구조를 그대로 사용할 경우 절연재의 열화로 인한 변압기 수명 감소를 야기한다는 문제점이 있다. 이를 해결하기 위해서는 냉각구조의 개선과 절연물 최고 허용온도가 높은 절연재를 사용하는 방법 등을 들 수 있다.

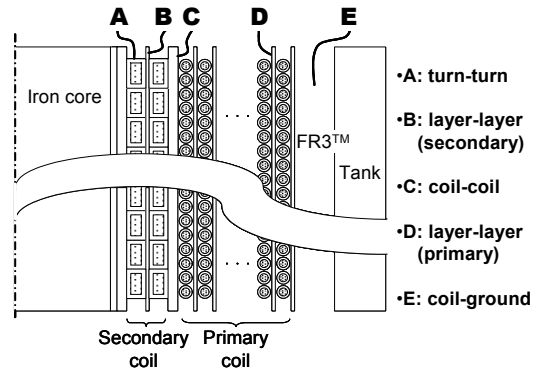
본 연구에서는 식물성절연유를 사용한 친환경 주상변압기 개발을 위하여 종래의 권선구조는 그대로 유지하면서 절연물 최고 허용온도가 180℃ 이상으로 높은 H종의 절연재를 사용하여 높은 점도로 인한 문제점을 보완하고, 종래의 절연재와 절연구조를 개선하여 22.9 kV급 친환경 유입식 주상변압기의 최적화된 절연설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 식물성절연유를 사용한 주상변압기의 절연구조

본 연구에서 개발 중인 친환경 주상변압기는 철심 주위에 각각 복수층의 2차 코일과 1차 코일이 반경 방향으로 순차적으로 권선되어 있고, 이들 권선부가 식물성절연유에 함침 되어있는 구조이다. 각 구조부의 절연은 DuPont사의 H종 Nomex 절연지를 사용하고, 식물성절연유는 미국 Cooper Power System사의 Envirotemp® FR3™를 사용하였다. Nomex 절연지는 레진이나 바니쉬로 보강하지 않더라도 우수한 내전압 및 기계적 강도를 가질 뿐만 아니라 200℃까지는 그 특성변화가 거의 없고, 주요 특성들은 약 220℃의 온도에서 최소 10년 이상 유지된다고 보고되어 있다[1]. FR3™는 발화점 및 인화점이 300℃ 이상으로 기존 팜유에 비해 2배 이상 높고, 우수한 생분해성과 취급이 용이하다는 장점을 가지고 있다[2].

그림 1에 식물성절연유를 사용한 친환경 주상변압기의 주요 절연구조를 나타낸다. 변압기의 절연구조는 Nomex 절연지를 사용하여 2차 코일을 버트갭(butt-gap) 방식으로 복수 회 중첩하여 감아서 각 턴 사이를 절연하는 턴간 절연(A), 2차 코일의 각 층 사이에 Nomex 절연지를 삽입하여 절연하는 저압측 층간 절연(B), 1차 코일과 2차 코일 사이에



〈그림 1〉 식물성절연유를 사용한 주상변압기의 주요 절연구조.

〈표 1〉 절연구성별 설계 주안점

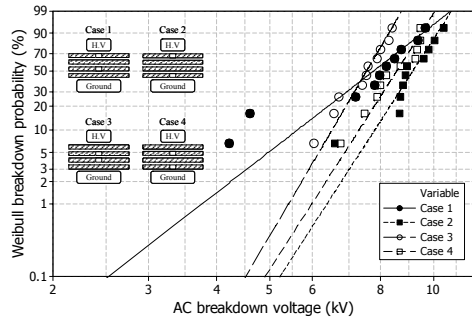
절연구성	설계 주안점
턴간 절연 (A)	저압권선용 도체를 일정폭으로 절단된 얇은 Nomex를 butt-gap 방식으로 감아서 절연한 관통절연과피
저압측 층간 절연 (B)	2층으로 권선된 저압권선의 각 층간 Nomex의 관통절연과피 및 연면방전
권선간 절연 (C)	저압권선과 고압권선 사이의 권선간 Nomex의 관통절연과피 및 연면방전
고압측 층간 절연 (D)	32층으로 권선된 고압권선의 각 층간 Nomex의 관통절연과피 및 연면방전
대지간 절연 (E)	최외각 고압권선과 외함 사이에 존재하는 FR3™의 관통절연과피

Nomex 절연지를 삽입하여 절연하는 권선간 절연(C), 1차 코일의 각 층 사이에 Nomex 절연지를 삽입하여 절연하는 고압측 층간 절연(D) 및 최외각 코일층과 본체 내벽 사이를 일정거리 이격하여 절연하는 대지간 절연(E)으로 구분되며, 표 1에 각 절연구성별 설계 주안점을 나타낸다. 상기와 같은 주상변압기의 절연구조는 기존의 주상변압기에서 사용되던 A종 크라프트지 보다 최고 허용온도가 높은 H종의 Nomex 절연지를 사용하고, 각 절연구조의 설계치를 최적화함으로써 팜유보다 점도가 높은 식물성절연유를 사용함에 따라 상승하는 변압기 내부온도로 인하여 절연지가 열화되는 문제점, 그리고 그에 따른 절연과피 및 연면방전 문제를 방지할 수 있다.

2.2 식물성절연유를 사용한 주상변압기의 절연설계

2.2.1 턴간 절연

2차 코일의 턴간 절연에 있어서 코일의 작업성을 개선하기 위하여 일정한 폭으로 절단된 절연지를 butt-gap 방식으로 2차 코일의 외주면에 감아서 절연하는 구조이며, butt-gap에서 절연성이 저하되는 것을 방지하기 위해 서로 인접하는 층에 대해 butt-gap을 중심으로 50%씩 중첩하도록 복수 층으로 절연지를 감았다. Butt-gap 방식은 먼저 한 장의 절연지를 겹치지 않도록 소폭을 띄워가면서 감고, 그 위에 두 번째 장의 절연지를 원하는 비율로 중첩하여 동일한 방식으로 필요한 절연두께 만큼 여러 장을 중첩하여 절연하는 방식이다. 또한 butt-gap 방식에서 중첩 비율이라는 것은 절연지 상·하층간에 절연지폭의 겹치는 정도를 뜻하는 것으로써, 50% 중첩한다는 것은 절연지 상·하층간에 절연지폭의 절반이 겹치도록 감는 것을 의미한다. 이때, 감는 회수(층) 마다 반대방향으로 감아 절연지의 풀림을 방지하였는데, 예를 들면 2차 코일에 제일



〈그림 2〉 턴간 절연구조의 절연지 적층 패턴에 따른 AC 절연파괴 전압에 대한 Weibull 확률분포도.

먼저 감기는 절연지층을 코일의 길이 방향에 대해 \ 방향으로 감은 경우이면 그 위층에 감기는 절연지는 / 방향으로 감게 된다. 본 연구에서는 0.05 mm 두께의 Nomex 절연지를 사용하였으며, 작업공정상의 결함이나 절연지 자체의 불량을 감안하여 감는 회수를 4회로 하여 단위 면적에서 butt-gap을 제외하고 최소 2장의 절연지가 적층되도록 하였다.

그림 2에 턴간 절연구조의 절연지 적층 패턴에 따른 AC 절연파괴 전압에 대한 Weibull 확률분포도를 나타낸다. 그래프 좌측 상단에 표시된 4가지 적층 구조는 butt-gap 방식으로 서로 중첩하여 절연지를 감는 경우 발생 가능한 취약한 절연구조를 나타낸 것으로, 음영을 표시하지 않은 부분이 butt-gap을 나타낸다. 저압측 턴간 내전압은 수십 볼트에 불과하며, 턴간 절연에서 가장 취약할 것으로 생각되는 4가지 경우(4장의 적층 수에서 단위 면적당 butt-gap이 2개 삽입되는 경우)의 절연파괴 전압을 살펴보면 가장 낮은 절연파괴전압을 보이는 case1의 경우조차도 방전확률 0.1%인 지점의 절연파괴전압은 2.5 kV로 조사되어 충분히 만족하는 결과를 보이고 있다. 따라서 위의 4가지 이외의 경우(4장의 적층 수에서 단위 면적당 butt-gap이 1개 또는 존재하지 않을 경우)에서는 butt-gap이라는 약점이 줄어들기 때문에 당연히 더 높은 절연내력을 지닐 것으로 예상된다.

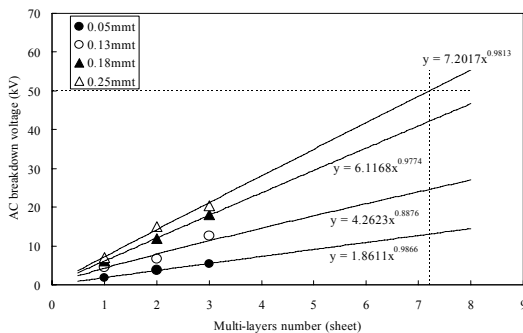
한편 1차 코일의 고전압측의 경우 2차 코일에 비해 단면적이 매우 작아 절연지 절연하기는 어려운 구조이다. 종래의 방식에서 1차 코일은 주로 AIW(Polyester imide coated wire)가 사용되는데, 이는 가혹한 열적 조건에 우수하고 화학적 조건에 대한 내구성도 우수하며, 특히 내열 온도가 200℃에 달해 고온에서 안심하고 사용할 수 있는 특성을 갖고 있다. 따라서 본 식물성절연유를 이용한 주상변압기의 1차 코일의 절연에 대해서는 종래 방식을 그대로 사용할 수 있을 것으로 사료된다.

2.2.2 층간 및 권선간 절연

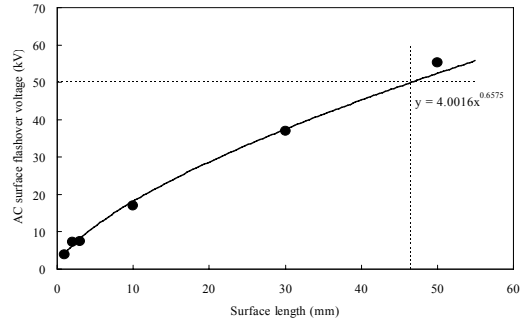
저압측 층간 절연, 권선간 절연 및 고압측 층간 절연의 경우 각 층 또는 1차 코일과 2차 코일 사이에 절연지를 삽입하여 관통 절연파괴 및 연면방전을 방지하는 절연구조인데, 본 연구에서는 각 경우에 대해 서로 다른 두께를 가지는 Nomex 절연지를 서로 다른 수만큼 적층하여 절연 파괴 및 연면방전에 관한 실험을 하였으며, 그 결과를 그림 3과 그림 4에 나타내었다. 그림은 Weibull 통계치리를 통해 0.1% 지점의 절연파괴 또는 연면방전 확률을 가지는 전압을 나타낸 것이다.

저압 및 고압측 코일의 층간 내전압은 AC 50 kV를 설계 내전압으로 하였을 경우 약 1.6 kV 정도를 넘지 않는다. 그림 3에서 두께 0.13 mm Nomex 절연지의 AC 절연파괴 실험식 $y=4.2623x^{0.8876}$ 을 이용하면 1장의 절연지라도 약 4.3 kV를 견딜 수 있어 층간 절연의 절연파괴 내전압을 만족하고 있다. 또한 층간의 연면거리의 경우도 그림 4에서 Nomex 절연지의 연면방전 실험식 $y=4.0016x^{0.6575}$ 을 이용하면 약 0.25 mm의 연면거리가 계산되어지며, 이에 여유치를 고려하여 층간 절연의 연면거리를 1 mm로 설계하였다.

권선간 절연의 경우 유입식 주상변압기의 상용전압 시험기준인 AC



〈그림 3〉 식물성절연유 중 Nomex의 적층 수에 따른 0.1% weibull 확률을 갖는 AC 절연파괴 전압.

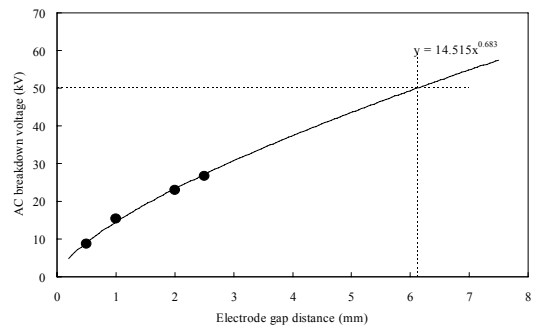


〈그림 4〉 식물성절연유 중 Nomex의 연면 길이에 따른 0.1% weibull 확률을 갖는 AC 연면방전 전압.

50 kV 조건에서 0.1% 이하의 절연파괴를 나타내는 조건은 AC 절연파괴 실험식 $y=7.2017x^{0.9813}$ 에 의해 0.25 mm 두께의 Nomex 절연지를 약 8장 이상을 사용하는 것으로 설계되어지며, 연면방전의 경우는 실험식 $y=4.0016x^{0.6575}$ 에 의해 약 47 mm 이상인 것으로 설계되어진다.

2.2.3 대지간 절연

마지막으로 대지간 절연의 경우 최외각 코일층과 상기 주상변압기의 본체 내벽 사이를 일정거리 이격하여 그 사이에 채워진 식물성절연유에 의해 절연하는 구조인데, 그림 5에 식물성절연유의 전극 간격에 따른 AC 절연파괴 전압을 나타낸다. Weibull 통계치리를 통해 0.1% 지점의 절연파괴 확률을 가지는 전압을 나타낸 것으로, 유입식 주상변압기의 상용전압 시험기준인 AC 50 kV 조건에서 0.1% 이하의 절연파괴를 나타내는 조건은 실험식 $y=14.515x^{0.6575}$ 에 의해 이격거리가 약 6.2 mm 이상인 것으로 조사되었다.



〈그림 5〉 식물성절연유의 전극 간격에 따른 0.1% weibull 확률을 갖는 AC 절연파괴 전압.

3. 결 론

본 연구에서는 22.9 kV급 식물성절연유를 사용한 친환경 주상변압기 개발을 위하여 종래의 권선구조는 그대로 유지하면서 절연물 최고 허용 온도가 180℃ 이상으로 높은 H종의 Nomex 절연지를 사용하여 식물성절연유의 높은 점도로 인한 온도상승 문제를 보완하고, 종래의 절연재와 절연구조를 개선하여 22.9 kV급 친환경 유입식 주상변압기의 최적화된 절연설계를 수행하였다. 변압기의 절연설계를 위하여 절연구조를 크게 5가지로 분류하였으며, 식물성절연유 중에서 Nomex 절연지의 AC 절연 파괴 및 연면방전 특성과 식물성절연유의 AC 절연파괴 특성을 실험을 통해 조사하였다. 각 절연구성별 절연설계는 턴간 절연은 두께 0.05 mm Nomex 절연지 4매, 고압 및 저압측 층간 절연은 두께 0.13 mm Nomex 절연지 1매와 연면거리 1 mm, 권선간 절연은 두께 0.25 mm Nomex 절연지 8매와 연면거리 47 mm, 대지간 절연의 이격거리는 6.2 mm 이상으로 계산되어졌다.

[참 고 문 헌]

- [1] A. Bhatia, "Aramid Papers with Improved Dimensional Stability", Electrical Electronics Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, pp. 409-410, 1995.
- [2] C. Patrick McShane, John Luksich, Kevin J. Rapp, "Retrofilling Aging Transformers with Natural Ester based Dielectric Coolant for Safety and Life Extension", IEEE-IAS/PCA Cement Industry Conference, pp. 1-8, 2003.