

345kV 변전소 주변압기 3차측용 건식형 분로리액터 개발

안용호*, 박종범, 송택상, 한병성
 한전 전력연구원, 한전 전력연구원, 보성파워텍(주), 전북대학교

The Development of Dry-type Shunt Reactor for 345kV Substation Main Transformer

Y.H.An*, J.B.Park, T.S.Song, B.S.Han
 Kepri, Kepri, Bosung Power Tec., Chonbuk National University

Abstract - Shunt reactors are used to compensate for capacitive VARs generated by lightly loaded transmission lines or underground cables. They are normally connected to the transformer tertiary winding. Dry-type shunt reactors have the advantage compared with oil-immersed shunt reactor as follows. Lower investment and maintenance cost. No fire hazard and no environmental concerns. Simple insulation to ground. Response to transient overvoltage less severe. Linearity of inductance versus load current. Lower acoustic noise. Easier transport and handling due to lower weight. No oil-collecting system must be provided since there is no oil that can leak into the ground.

1. 서 론

분로리액터(Shunt Reactor)는 전력계통의 선로 정전용량과 병렬로 설치하여 경부하시 345kV 선로 충전용량 및 지중케이블에 의한 잉여 무효전력을 흡수하여 적정전압을 유지하기 위하여 사용되는 조상설비를 말한다. 현재 국내에서는 유입식 분로리액터를 사용하고 있으며, 오일 절연방식이기 때문에 중량이 무겁고, 분로리액터의 감시 및 제어장치가 복잡하며, 화재의 위험이 있고, 과전압 인가시 코아의 포화로 인덕턴스 값이 변하며, 운반설치가 어렵고, 주기적인 유지보수가 필요한 실정이다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 건식 공심형 리액터를 제안하였으며, 특히 높은 인덕턴스 값을 얻기 위하여 구조가 커지므로 이를 개선하여 소형, 경량화 하기 위하여 중심에 부분적으로 코어를 삽입하여 크기를 축소하는 방안을 제시하였다.

2. 본 론

2.1 건식형 분로리액터의 장점

건식 분로리액터(Dry-type Shunt Reactor)는 유입식과 비교하여 오일을 사용하지 않기 때문에 화재의 위험이 없으며, 대기간 절연의 경우 단순히 지지대자를 이용하여 절연하기 때문에 절연이 용이하고, Core를 사용하지 않기 때문에 부하전류에서부터 고장전류까지 인덕턴스의 변화가 없고, 소음이 적다. 중량이 가벼워 운반 및 설치가 용이하며, 대기간 정전용량이 적어서 과도 전압에 대한 응답성이 우수하고, 공심형 구조이기 때문에 오일 정제 시스템이 필요없는 장점을 가지고 있다. 이외에도 화재 방지용 벽이 필요없으며, 각종 보호장치(온도 감시, 압력감시등)가 필요없어 보호 및 감시가 용이하다. 이와 같은 이유로 선진외국에서는 유입식 분로 리액터 대신에 건식 분로리액터를 점차 확대하여 사용하고 있는 추세이다.

2.2 건식형 분로리액터의 설계 제작

2.2.1 리액터의 전자기 수치해석

최근의 수치전계 계산법의 발달에 의해서 어떤 구체적인 문제에 해석이 가능하게 되었다. 리액터는 실린더형 구조로써 Silicon Steel, Reactor Coil, 공기등으로 이루어져 있다. 따라서 도체로부터의 전계분포는 다양하며, 유전체 내의 어느 지점에 전계 집중부위가 발생되어, 그 부분에서 전기적인 파괴를 동반할 수가 있다. 이를 방지하기 위해서는 정확한 전계해석에 의한 결과를 근거로하여 Reactor의 설계를 정확하고 합리적으로 해야 한다. 계산식과 경험에 의해서 개략적인 설계를 행하고, 이를 전계해석에 의해서 최적 설계를 한 후 시작품을 제작하여 성능시험을 실시함으로써 최종적인 검증을 하게 된다. 최적의 Reactor를 개발하기 위하여 시작품 제작의 전단계에서 여러 가지 형태, 크기, 재질의 종류에 따라 특성을 점검하고 최종 제작모형을 선정해야 한다. 본 건식형 분로리액터의 최적설계에 적용한 전자기 수치해석 이론은 다음과 같다.

2.2.1.1 유한요소법에 의한 수치해석

유한요소법(Finite Element Method : FEM)은 토목, 기계 등 구조분야에서 발달, 1968년 Zienkiewicz가 처음으로 도입하였다. 전계계산의 대상이 되는 문제가 대형화되고 복잡해 짐에 따라 차분법보다 유한요소법이 더 선호되어 사용되고 있다. 그 이유는 첫째, 차분법은 각 해석부분을 등분할 하는데 반해 유한요소법에서는 전계변화가 심하지 않은 곳은 영역을 대강 분할하는 등의 영역분할에 자유도가 있으며, 둘째, 차분법에서는 영역분할에 있어 어떤 특별한 처리가 필요한데 반해 유한요소법에서는 경계값을 지정하지 않고 경계에서는 자동적으로 $\partial\phi/\partial n = 0$ 의 조건이 만족하여 경계처리가 용이하고, 셋째, 차분법은 해석장의 방정식을 직접 차분식으로 치환하므로 계산순서는 간단하나, 계산수법에서의 변화가 심한 반면 유한요소법은 적분식(포텐셜 에너지)으로부터 출발하므로 보다 유연성이 있으며, 넷째, 프로그램이 복잡하고 장대한 경우 최대 결점은 입력 데이터의 작성으로 많은 노력이 필요한데 이것은 자동요소 분할법으로 입력 데이터를 자동으로 작성하여 입력하게 된다.

유한요소법에서 요소의 종류는 그 해석하고자하는 영역이 2차원장, 축대칭 3차원장 혹은 일반 3차원장 중 어떤 장이냐에 따라 삼각형, 사각형, 사면체 혹은 육면체 등 여러가지로 나뉜다. 그 중에 잘 쓰이는 것은 1차 근 사삼각형요소이며, 삼각형의 정점을 절점(Node)이라고 부르며 이것에도 연속적인 번호가 붙여진다. 이 절점은 두가지를 나뉘어지며 그 영역의 경계조건에 따라 절위를 알고 있는 절점과 전위를 구하고자 하는 영역의 절점으로 된다. 요소 e의 절점 i,j,k의 좌표는 $(x_i, y_i), (x_j, y_j), (x_k, y_k)$ 라하고 각각의 전위를 ϕ_i, ϕ_j, ϕ_k 라 하자. 각요소의 전위근사함수로는 일반적으로 좌표의 1차식으로 나타내며 여기서도 1차 근사를 사용한다. 이때 ϕ_i, ϕ_j, ϕ_k 가 구해지면 영역

안의 임의의 점 P점의 전위를 구할수 있다. 전위좌표가 1차식으로 근사된 경우 이런 요소를 1차 삼각형요소라 한다. 해석영역 각 절점의 전위를 안다면 임의의 점의 전위를 구할수 있다. 결국 문제는 어떻게 각 절점의 전위를 알 수 있는가이다. 각 절점의 전위는 일반적으로 변분법의 원리를 이용하여 구한다. 변분법의 원리는 에너지 법칙이라고도 불리우는 물리적법칙으로서 전위는 그 계의 에너지가 최소가 되게 분포한다는 사실에 기초를 둔다.

Electrostatics의 Source는 Electric Charge Density와 경계상의 Prescribed Potential 등이며, Variable은 Electric Potential V인데, Electrostatics의 문제에 유한요소법을 적용하는 그 지배방정식을 고찰해 보면 전자기 현상을 수학적으로 해석하는 기본방정식은 다음의 Maxwell 방정식이다.

$$\begin{cases} \nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \vec{H} = \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \vec{D} = \rho \\ \nabla \cdot \vec{B} = 0 \end{cases}$$

2.2.2 리액터의 자체해석

본 논문에서 설계 제작된 Reactor의 구조는 그림 1과 같다.

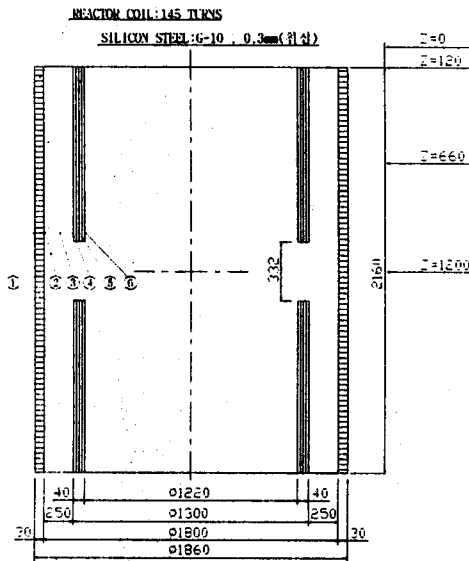


그림 1. Reactor 코일구조

본 연구의 대상인 Reactor의 전자계해석은 상용코드인 FLUX 2D를 이용하여 유한요소법에 의해서 진행했다. 정확한 결과를 얻기 위하여 종축방향의 기준점 (Z=0)을 리액터 코일의 최상부에서 +120mm 떨어진 위치를 기준점으로 하여 리액터 코일의 최하부에서 -120mm 떨어진 위치까지 계산을 하였다.

2.2.2.1 공심코어(Air-Core)의 자체해석

FLUX 2D를 이용하여 공심코어(Air-Core)를 적용하여 설계하였을 경우 자력선 분포는 그림 2와 같으며, 리액터 코일 바깥쪽의 자체분포는 그림 3에서 나타내었으며, 리액터 코일 안쪽면의 자체분포는 그림 4에서 나타내었다.

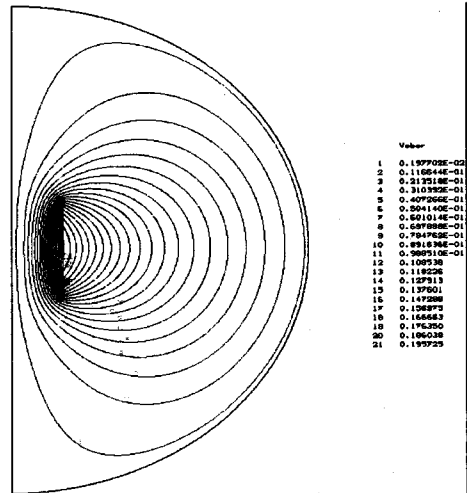


그림 2 자력선 분포

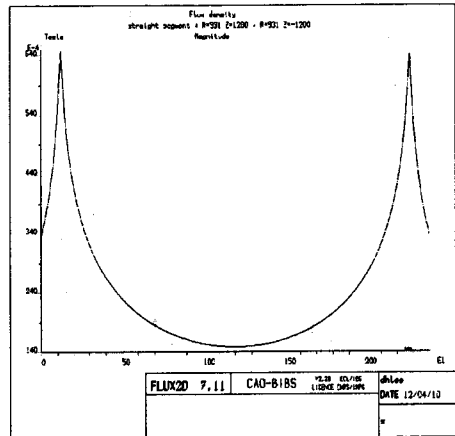


그림 3 리액터 코일 바깥면의 자기분포

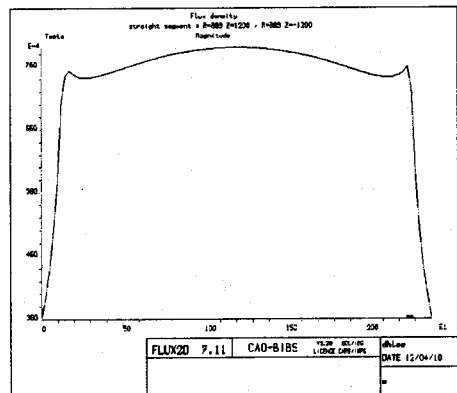
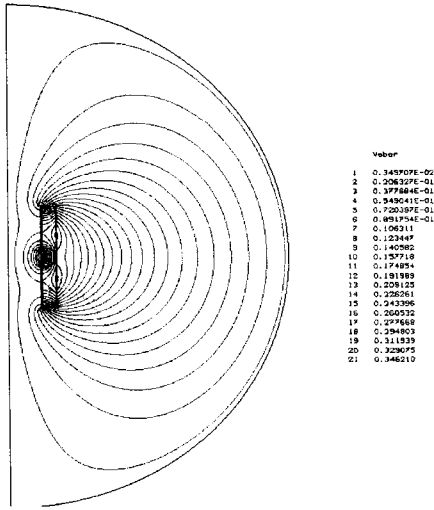


그림 4 리액터 코일 안쪽면의 자기분포

2.2.2.2 부분코어(Part-Core)의 자계해석

FLUX 2D를 이용하여 부분코어(Part-Core)를 적용하여 설계하였을 경우 자력선 분포는 그림 5와 같으며, 리액터 코일 바깥쪽의 자계분포는 그림 6에서 나타내었으며, 리액터 코일 안쪽면의 자계분포는 그림 7에서 나타내었다.



Silicon Steel $\mu_r = 23000$,
Reactor Coil = 145 Turn , 1118.4A

그림 5 자력선 분포

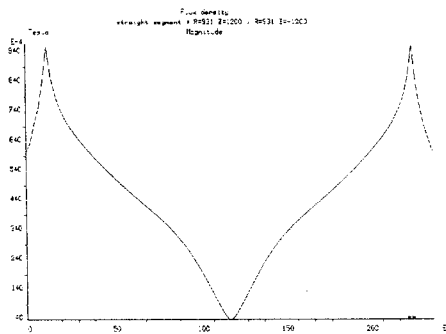


그림 6 리액터 코일 바깥면의 자계분포

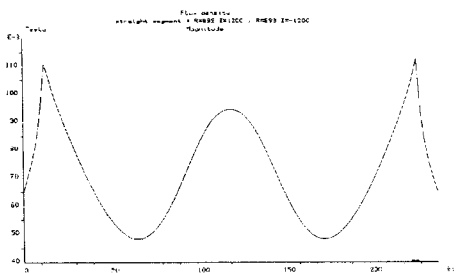


그림 7 리액터 코일 안쪽면의 자계분포

2.3 건식형 분로리액터 설계시 문제점 및 대책

2.3.1 부분코어(Part-Core) 적용시 개선 효과

공심코어(Air-Core)를 적용하여 설계를 하였을 경우 보다 부분코어(Part-Core)를 적용하여 설계·제작하여 개선된 효과는 병렬 권선의 전류 등비는 1.0%까지 접근되었으며, 부분코어(Part-Core) 사용에 의한 인덕턴스 증가는 Air 만의 경우보다 93% 더 증가된 효과를 가져올 수 있었다. 또한 부분코어(Part-Core)의 형상에 따라 인덕턴스값은 공심일 경우보다 최대 2.5배까지 상승이 가능하며, 자계를 리액터의 중심부에 밀집시키므로 리액터의 구조를 축소할 수 있고, 누설자속이 작아 리액터 설치간격을 공심인 경우보다 근접시킬 수 있는 효과를 얻었다.

2.3.2 설계 제작시 문제점 및 개선대책

공심코어(Air-Core)를 적용하였을 경우 문제점을 개선하여 1차 설계 제작 하였으나 다음과 같은 문제점이 발생하였다. 첫째, 상부, 하부 지지구조의 후레임은 비자성체인 경우에도 국부 가열이 발생하였으며, 둘째, 자속과 나란히 진행되는 구조물도 비자성체가 아닌 경우 상부, 하부에서는 자속의 Fringing 효과에 의한 발열이 되었으며, 셋째, 부분코어(Part-Core)의 Center를 Coil Center 부분에만 밀집시킨 결과 인덕턴스 증가 효과가 작았음을 알 수 있었다.

이러한 문제점에 대한 개선대책으로 부분코어의 형상을 적절히 설계하여 인덕턴스의 증가 효과를 극대화 하여야 하며, 권선간 전류분포를 일정하게 유지시키기 위하여 건식형 분로리액터 제작시 사용한 단일 Coil대신에 Transposition Coil을 사용 전류분포를 일정하게 하여야 한다는 결론을 얻었다.

2.3.3 설계 제작시 고려사항

건식형 분로리액터의 최적설계를 위하여 문제점을 분석하여 개선대책을 적용시 다음과 같은 사항을 고려하여 설계 제작하였다. 첫째, 병렬 권선의 도체수를 극대화하여 단일 Coil로 하되 Transposition 또는 Twist를 완전하게 실시하여 전기적 특성을 양호하게 하여야 하며, 둘째, 부분코어(Part-Core)의 Center를 Coil Center에 맞추되 직경을 크게하고 중심부는 채우지 않는 구조로 하며, 셋째, 상, 하부 후레임에 흐르는 전류가 Loop 구조가 되지 않게 구조를 개선하고, 넷째, 자속의 Fringing되는 부분에 대한 개선을 하여 설계 함을 알 수 있었다.

2.4 건식형 분로리액터의 최적설계 제작

2.3에서와 같은 문제점을 해결하고 최적설계 및 제작을 하기 위하여 다음과 같이 보완하여 설계 제작하였다.

2.4.1 권선의 구조 설계

분로 리액터는 Coil 도체가 불균일한 자계중에 있게됨으로 개개의 도체내에 서로 다른 유기전압이 발생하게 되고 이것에 의하여 Eddy Current가 흐르며 따라서 Eddy Current Loss를 발생시키게 된다. 그러나 설계로는 불균일한 자계이므로 손실을 최소화함으로써 온도 상승을 낮추기 위하여 본 분로리액터는 두께가 얇고 비교적 폭이 작은도체 25개를 1 Turn 중에서 각 위치가 각기 다른위치에 있도록 Transposition이 실시된 Transposed Wire를 사용하였다.

2.4.2 철심 구조 설계

건식형 분로리액터 제작시의 부분코어(Part-Core)의 형상과 설치구조는 그림 8과 같다. 이러한 구조로 제작하여 시험한 결과 Core 상하부 Coil과 가장 근접한 부분의 온도가 130°C정도로 상승되는 결과를 가져왔으며 인덕턴스는 공심코어(Air-Core)의 경우보다 93% 증가

하는 것으로 측정되었다.

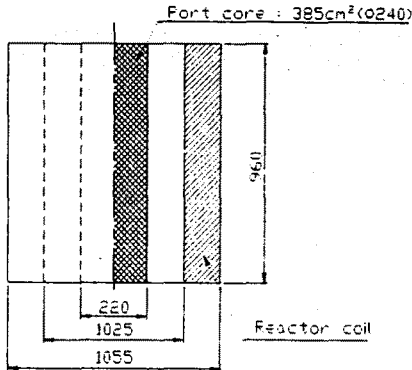


그림 8 부분코어(Part-Core)의 철심구조

최적설계시에는 공심코어(Air-Core) 리액터의 자계를 분석하여 그 내용에 부합되도록 다음과 같이 실시하였다. Core의 단면적을 최대로 하고 전체 자기 저항이 적도록하여 가장 효과적으로 자속발생을 많이 할수 있도록 하는 동시에 냉각표면적이 최대로 되는 조건의 방법을 강구하였다.

이 조건을 만족시키기 위하여 코일과의 이격거리는 최소의 절연거리만을 두어 자속의 자로를 짧게하는 동시에 Core의 형상을 다각형 구조에서 원통형 시린다 형태로 하여 공기 접촉면을 늘려 냉각성능을 향상시켰다.

3. 결 론

본 논문에서 제시한 건식형 분로리액터 개발을 통하여 분로리액터 제작방식에 있어 건식 부분코어형의 신기술을 채택하여 세계 최초로 건식 분로리액터에 적용하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. 오일을 사용하지 않기 때문에 화재의 위험이 없다.
2. 부분코어(Part-Core)를 사용하기 때문에 구조가 적어짐으로 고장전류까지 인덕턴스의 변화가 없으며, 소음이 적다.
4. 중량이 가벼워 운반 및 설치가 용이하다.
5. 대기간 정전용량이 적어서 과도 전압에 대한 응답성이 우수하다.
6. 공심형 구조이기 때문에 오일 정제 시스템이 필요없다.
7. 각종 보호장치(온도감시, 압력감시 등)가 필요없어 보호 및 감시가 용이하다.
8. Part-Core의 인덕턴스는 공심코어(Air-Core)의 경우보다 93% 증가 하는 것으로 측정되었다.

본 논문에서 제시한 건식형 분로리액터의 개발로 기존의 유입형 분로리액터를 대체할 수 있는 기반을 구축하였으며, 전력공급 신뢰도 향상에 기여할 것으로 기대된다.

(참 고 문 헌)

- [1] Electromagnetics McGRAW Hills, John D. Kraus
- [2] Electromagnetic and Electromechanical Machines, Wiley, Leander W. Matsch
- [3] Air-Core Dry Type Reactor, Naefely Trench
- [4] 신판 전기공학대사전, 도서출판 기다리
- [5] 전자기학, 조창서적
- [6] 한국전력공사, "345kV 변전소 주변압기 3차측용 건식형 분로리액터 개발", 최종보고서, 2000년