345KV급 분로리액터 설계 및 제조기술 개발

강 길 건 , 김 세 창 / 현대중전기(주)

A development on the design and manufacturing technique of 345KV class shunt reactor.

Gil-Gun Kang · Se-Change Kim
Hyundai Electrical Engineering Co.,LTD

1. 개 요

근년 하절기 냉방수요의 증가에 따라 부하역률 및 부하율이 저하되고 초고압 송전선로와 지중 송전선로 증대로 수전단 전압이 상승되는 문제가 크게 대두되고 있다.
전압을 규정된 범위로 유지하기 위해서는 무효 전력의 공급이 균형을 이루도록 전력계통을 적절히 조정하여야 하는데 이러한 방법으로 송전선로에 분로리액터를 설치함으로써 경부하시에 송전선로에서 발생되는 용량성 무효전력을 보상하여 계통에 접속된 수용가와 전력기기가 정상적인 기능을 발휘할 수 있도록 계통전압을 언제나 정해진 전압변동을 이하로 유지시켜 전력계통의 안정도와 송전효율을 향상시킬 수 있다.
그러나 국내 송전선의 대부분이 345KV로 승압되어 있음에도 불구하고 345KV급 분로리액터가 개발되어 있지 않기 때문에 국내에서는 송전선로 모선에 설치하지 못하고 1차 변전소 주변압기의 3차측 선로(23KV)에 설치함으로써 송전효율이 그만큼 저하되어 있는 상태로서, 345KV 분로리액터의 국내개발이 필수적으로 요구되며, 향후 765KV로 송전전압 격상시 송전선로에 설치할 765KV급 분로리액터 개발의 예비 단계로서 제작기술의 연구 및 확보가 필수적이라 할 수 있다.
따라서, 초고압 분로리액터에 대한 정확한 이해를 돕기 위하여 분로리액터의 기본설계 이론과 구조소개 및 기타 특이성등에 대하여 기술코저 한다.

2. 기본설계 이론소개

분로리액터의 정격용량은 자계 (Magnetic Field) 안에 분포되어 축적된 에너지에 비례한다.

분로리액터의 정격용량에 따라 리액터에 필요한 자기에너지 (Magnetic Energy)는 아래와 같은 수식으로 표현될 수 있다.

$$W_G = (L_N I_N^2)/2 \qquad (1)$$

여기에서,

W_G : 자기 에너지 (Magnetic Energy in Joule)

L_N : 정격 인덕턴스 (Rated Inductance in Henry)

I_N : 정격전류 (Rated Current in Ampere)

또한, 분로리액터의 자계내에 분포되어 축적된 에너지는 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$W_G = (M_0 \cdot M_r \cdot \sum_V H_N^2 \cdot \Delta V)/2 \qquad (2)$$

여기에서,

M_0 : 공기 투자율 (Magnetic Space Constant in Henry/Meter)

M_r : 비 투자율 (Relative Permeability in Unit)

H_N : 번수 ΔV에서 정격전류에 대응하는 자계의 세기 (Magnetic Field Strength at Rated Normal Current in Volume Element ΔV in Ampere/Meter)

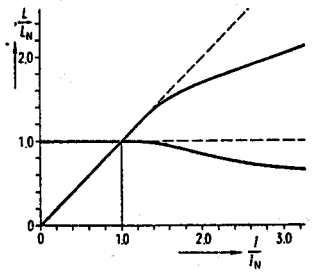
자계의 세기는 경험적으로 얻어진 계략적인 실험식이나 이론적인 요소법에 따라 정해진 식으로 계산이 가능하다. 잘 알려진 바와같이 상기와 같은식은 권선의 도체사이에 절연공간. 권선과 철심사이의 절연공간 및 철심각 (CORE LEG)에 배치된 공극 (AIR GAP)의 내부에 분포되어 축적된 자계의 세기를 정확히 계산하는데 사용되어진다.

(2)식에서 알수있는 바와같이 일정한 비투자율의 물체로 구성된 공간에서는 변수 △V에 따라 매체에 축적되는 자계의 강도가 변화한다.
그러나 높은 자계의 강도는 비자성 물체안에서만이 형성되어질 수 있다. 즉 투자율이 공기와 유사한 물질만이 많은 자기 에너지를 축적시키는데 적합하다. 여기에서 공극형 리액터 (AIR GAPPED CORE TYPE REACTOR)와 공심형 리액터 (CORELESS TYPE REACTOR)사이에 현저한 특성 차이를 나타내는 2가지 특성만을 비교해보기로 하자.
첫째, 공극형 리액터의 경우에 축방향 권선높이 대비 철심각에 배치된 공극의 총높이를 백분율 (%)로 ℓ이라고 표시한다면 공극형 리액터의 공극에 축적되는 자기에너지는 공심형 리액터의 권선도체 사이의 절연공간에 축적되는 자기 에너지의 약 100×ℓ배 정도가 된다.
둘째, 상기 두종류의 리액터 중신무게가 동일한 경우에 리액터의 정격용량을 비교해 보면 공극형 리액터의 정격용량은 공심형 리액터의 정격용량보다 대단히 크다는 것을 알 수 있다.
리액터 설계시 자계 강도계산의 평방근식이 자기에너지 계산에 자주 사용되지만 이와같은 계산식은 자기에너지가 선형변화를 하는 범위내에서 유효하다. 철심각을 형성하고 있는 CORE PACKET 사이의 공극 중심부에 분포되는 자속 (MAGNETIC FLUX)은 철심각의 중심선 방향과 동일하게 직선적으로 형성되지만 공극외부에 분포되는 자속은 철심각과 권선사이에 설치된 절연공간을 통과하는 곡선형태로 분포된다.
리액터의 외형치수, 중량 및 총손실을 고려할때 리액터의 공극크기는 가능한 방법을 사용하여 여러개의 작은 크기의 공극으로 분산배치하는 것이 유리하다. 그러나 이와같은 공극의 분할 배치는 기계적인 강도, 효율적인 작업방법등의 이유로 최소 CORE PACKET의 높이가 제한되며 CORE PACKET사이의 최소 공극 SPACER의 높이등이 제한된다. 거의 모든 리액터의 자기에너지는 철심각에 배치된 공극, 철심각과 권선사이의 절연공간 및 권선 도체사이의 절연공간등에 분포되어 축적된다.
결론적으로 계산식(2)를 이용하여 리액터의 각 부분에서 계산되는 자기 에너지 즉 철심각에 배치된 공극, 철심각과 권선사이의 절연공간 및 권선 도체사이의 절연공간등의 부분에서 계산되어진 모든 자기 에너지는 리액터가 제작완료후 리액터의 내부에 분포되어 축적될 수 있는 총자계 에너지임을 의미한다.

상기 계산식(1)과 (2)로 부터 유도된 리액터의 인덕턴스 계산식은 HENRY 단위로 아래와 같이 표시된다.

$$L = (\mu_0 \cdot \mu_r / I_N^2) \cdot \sum_V I_N^2 \cdot \Delta V \qquad (3)$$

FIG 1에 표시된 바와같이 전압/전류의 특성이 선형변화를 갖는 범위내에서 상기식(3)으로 계산된 인덕턴스치는 리액터에 존재하는 실제 인덕턴스 값의 ±1.5% TOLERANCE 안에 존재한다.



(FIG 1) 분로리액터의 전압/전류 특성 및 인덕턴스의 변화

따라서 리액터를 조립한후에 리액터의 제작과정에서 리액터의 구조에 따라 형성되어진 인덕턴스 값을 정격인덕턴스 값으로 조정하기 위하여 권선에 TAP을 설치하거나 공극의 높이를 조절하기 위한 보조장치가 필요없다.
FIG 1에서 알 수 있는 바와같이 리액터의 정격 특성인 U_N, I_N, L_N와 리액터 운전조건에 따라 변화되는 특성치 U,I,L사이에는 아래와 같은식이 성립한다.

$$U/U_N = f(I/I_N),\ L/L_N = f(I/I_N)$$

통상적으로 리액터에 인가되는 전압이 정격 전압의 1.3배까지는 전압/전류특성이 선형으로 변화되지만 정격전압의 1.3배를 초과할 경우에는 이특성이 비선형적으로 변화한다.
정격전압의 1.3배 이상 1.7배 이하의 전압이 공극형 리액터에 인가되면 철심의 자속포화 때문에 인덕턴스가 현저하게 감소하며 1.7배 이상의 전압이 공극형 리액터에 인가될 경우에 전압/전류 특성은 공심형 리액터의 전압/전류 특성과 아주 흡사하게 된다.
이와같은 전압/전류특성은 공극형 리액터의 설계시 결정되는 정격자속밀도에 따라 다소의 차이가 있을 수 있다.

3. 구조소개

3상 분로리액터에서 구조적으로 중요한 부분은 철심, 권선 및 외함 부분으로 철심은 원형 PACKETS와 공극이 조합된 3개의 철심각과

각형으로 제작, 조립된 2개의 상하계철(YORK)로 이루어져 있다. 원형 PACKET는 냉간압연 규소 강판으로 제작하여 접착제를 사용 압축 접착 시키며 공극안에는 고탄력의 높은 기계적 강도를 갖는 비자성 물체가 삽입된다.
또한, 원형 PACKET와 공극 SPACER도 접착제를 사용하여 압축 접착하여 기계적 강도가 아주높은 철심각 형태로 제작된다. 철심계철도 냉각압연 규소강판을 사용하여 각형으로 적층 제작된다.
자계안에 배치된 원형 PACKET와 공극에서의 투자율 차이는 각각의 접속부분에서 형성되는 기계력의 발생요인이 된다.
이와같은 기계력은 계통 주파수의 2배로 맥동한다. HOOK의 법칙에 따라서 공극길이의 변화는 공극 SPACER의 단위 면적당 작용하는 힘에 비례하여 공극에 삽입된 물질의 탄성력에 반비례한다.
공극 SPACER의 탄력성 변화는 철심각과 계철의 진동요인이 되어 리액터의 소음을 유발시키며 정상상태에서 이러한 진동은 공극에서 동작하는 진동주파수와 동일한다.
원형 PACKET와 공극 SPACER에서 유발될 수 있는 변위를 방지하기 위해서 철심각은 CROSS ARM과 TIE ROD로 상·하 계철을 단단히 조여야한다.
CLAMPING DEVICE에는 권선조립후 SIZING FORCE로 수축된 권선높이와 충진건조시 수축되는 권선 높이를 보상시켜주기 위한 DISK SPRING이 설치 되어져야 한다.
리액터의 소음은 주로 공극높이의 변화 또는 진동의 증폭으로 생성되므로 공극에 설치되는 물질은 고탄성 계수를 갖는 물질이어야 하며 단위 면적당 최소 압력이 가해지도록 설계, 제작되어야 한다. 345KV급 초고압 리액터는 권선으로 침입하는 SURGE 전압을 효율적으로 분포시키기 위해서 HIGH SERIES CAPACITANCE DISK 권선 부분과 일반 DISK 권선부분을 조합 배치해야 하며 본 리액터의 경우에 철심각 높이의 중간부분에 최대 SURGE 전압이 침입할 수 있는 권선의 인입단자를 위치시키고 이 권선의 인입단자를 중심으로 상부와 하부에 설치한 DISK 권선을 병렬로 연결하였다.
결론적으로 권선의 SERIES CAPACITANCE를 증가 시켜서 SURGE 전압을 효율적으로 분포시키고 권선과 계철 사이의 절연거리를 축소시키는 설계 방법을 채택하였다.
철심의 계철에 인접하여 설치되어 있는 권선의 상부와 하부의 절연보강을 위하여 정전링 (ELECTROSTATIC RING)과 성형절연물 (ANGLE RING)이 설치되었다.
또한, 권선의 반경방향으로는 높은 전압의 권선이 철심에 인접되어 설치되어 있으므로 권선과 철심사이의 절연보강을 위하여 정전 차폐판(CYLINDERS FOR ELECTROSTATIC SHIELDING) 이 사용되었으며 권선과 외함사이에도 동심형 PRESSBOARD CYLINDER를 사용하여 절연보강이 되어있다. 각 상(PHASE) 별로 345KV 인결단자 인출을 위하여 권선과 외함사이에 설치된 동심형 PRESSBOARD CYLINDER는 한개의 인결단자 인출구가 설치되어 있으며 이와같은 인출구에는 굴뚝모양의 성형절연물로 절연보강이 되어있다.
성형권선으로 제작되는 리액터 권선은 철심각에 설치되기 전에 권선높이를 안정시키기 위하여 권선을 높은 압력으로 권선을 눌러 SIZING을 하고 진공 건조를 시키는 것과 같은 사전공정을 거친다. SIZING시 권선을 누르는 압력은 통상적으로 리액터의 돌입전류로 권선에서 발생되는 기계력보다 높은 압력으로 수행된다.
이와같은 기계력을 리액터 권선이 충분히 견딜수 있게하기 위해서 튼튼한 권선 지지구조인 PRESSWOOD 재질의 권선 받침목등이 사용된다.
조립된 권선의 압축력은 위에 설명된 정전링, 받침목 및 누름목 구조등을 통하여 권선에 전달 되어지며 이와같은 압력전달 구조물은 압축력을 견딜 수 있는 치수로 제작된다.

4. 기타 특이성 소개

리액터를 송전선로에 투입하면 순간적으로 리액터 철심이 여자되며 이때 철심에 유기되는 최대 자속은 리액터가 연속적으로 정상운전시 철심에 유기되는 자속크기의 약2배 정도까지 증폭이 된다.
이 증폭된 자속은 리액터 권선에 돌입전류를 흐르게하며 그 크기는 FIG 1 명시된 전압/전류 특성곡선과 같이 나타난다.
또한, 리액터의 권선에서 발생되는 최대 기계력은 이와같은 돌입전류에 의해서 발생된다.

5. 맺는말

본 리액터의 설계 및 제조기술 개발은 그동안 축적된 154KV급 분로 리액터의 제작 경험과 철저한 기초문헌 조사에 기인한 성과이다.
이러한 설계 및 제조기술 개발의 경험을 되살려 향후 765KV급 분로리액터의 설계 및 제조기술을 개발할 예정이다.