

HVDC 변환용 변압기의 DC-Bias 전류 유입에 따른 철심 구조별 자계 특성 비교

윤희성*, 이승욱*
LS 일렉트릭*

Comparative Analysis of Magnetic Field Characteristics according to Core Structure in HVDC Converter Transformers under DC-Bias Current Conditions

Heesung Yoon*, Seungwook Lee*
LS Electric*

Abstract - 본 논문에서는 HVDC 변환용 변압기의 밸브측 권선에 DC-Bias 전류가 유입되는 조건에서 철심 구조에 따른 자계 특성을 비교하였다. 철심의 비선형 B-H 특성을 고려한 등가 자기회로와 전압원 전기회로를 연성하여 시간 영역 과도해석을 수행하였으며, 1상 4각, 3상 3각 및 3상 5각 철심 구조를 대상으로 주각과 요크의 최대 자속밀도를 비교하였다. 해석 결과, 동일한 DC-Bias 전류 조건에서도 철심 구조에 따라 철심 각부의 자속밀도 증가량이 다르게 나타나는 것을 확인하였다.

1. 서 론

HVDC 변환 시스템에서는 AC 계통과 DC 계통의 연계를 위해 변환용 변압기가 사용된다. 일반 전력용 변압기와 달리 HVDC 변환용 변압기는 밸브측 권선을 통해 DC-Bias 전류의 영향을 받을 수 있으며, 이 전류는 교류 여자 기자력에 중첩되어 철심의 자속밀도 파형을 한 방향으로 편중시킨다. 이로 인해 특정 반주기에서 철심 포화가 발생할 수 있으며, 여자전류 증가, 자속밀도 왜곡, 철손 증가 및 주변 구조물 손실 증가를 유발할 수 있다 [1].

DC-Bias 전류에 의한 자속밀도 편중 정도는 인가되는 직류 전류의 크기, 권선의 턴수, 기자력의 방향, 철심의 자속 경로 및 자기저항에 의해 결정된다. 특히 철심 구조는 자속의 귀로와 분포 특성에 직접적인 영향을 미치므로, 동일한 DC-Bias 조건에서도 철심 구조에 따라 포화 위치와 자속밀도 증가 정도가 다르게 나타날 수 있다. 본 논문에서는 1상 4각, 3상 3각 및 3상 5각 철심 구조를 대상으로 DC-Bias 전류 유입에 따른 자계 거동을 등가자기회로법을 이용하여 계산하고, 철심 구조별 자속밀도 및 포화 특성을 비교하고자 한다.

2. 본 론

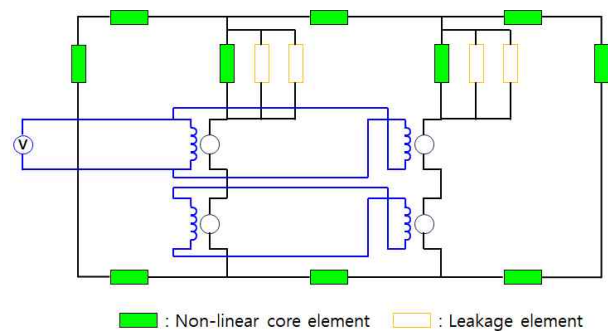
2.1 DC-Bias 해석을 위한 등가자기회로 모델

본 논문에서는 DC-Bias 전류 유입에 따른 변압기 철심의 자계 거동을 예측하기 위해 등가자기회로법을 적용하였다. 등가자기회로에서 철심의 각과 요크는 평균 자로 길이와 단면적을 갖는 자기저항 소자로 모델링하였으며, 철심 재료의 비선형 자기 특성은 B-H 곡선을 기반으로 반영하였다 [2].

DC-Bias 해석에서는 권선 전류에 직류 성분이 중첩됨에 따라 발생하는 기자력 편중을 모의해야 한다. 이를 위해 본 해석에서는 AC 전압원으로 정격 운전 조건을 구현하고, 밸브측 권선에 DC 전류 성분을 추가하여 DC-Bias 전류 유입 조건을 모의하였다. 이때 DC-Bias 전류에 의해 여자전류 파형은 비선형적으로 왜곡되므로, 전류 파형을 사전에 가정하기 어렵다. 따라서 본 해석에서는 전압원 전기회로와 비선형 자기회로를 연성하여 권선 전류, 기자력, 철심 자속 및 자속밀도를 계산하였다.

DC-Bias 전류가 유입되면 철심의 동작점이 B-H 곡선상에서 한쪽 방향으로 이동하게 되며, 특정 반주기에서 철심 포화가 발생할 수 있다. 이러한 현상은 비선형성과 시간 의존성을 갖기 때문에, 본 논문에서는 주파수 영역 해석이 아닌 시간 영역의 Transient 해석을 수행하였다.

그림 1은 본 논문에서 사용한 변압기 등가자기회로의 예를 나타낸 것으로, 1상 4각 변압기를 기준으로 구성하였다. 다른 철심 구조의 변압기는 권선 수, 철심 각 및 요크의 수를 확장하거나 변경하여 동일한 방식으로 모델링하였다.



〈그림 1〉 1상 4각 변압기의 등가자기회로

2.2 해석 대상 철심 구조 및 사양

본 논문에서 해석 대상으로 사용한 변압기의 기본 사양은 표 1과 같다. 각 철심 구조의 자계 특성만을 비교하기 위해 인가 전압, 주파수, 자속밀도 등 전기적 사양은 동일하게 설정하였다. 다만 철심 구조에 따라 자속 경로가 달라지므로 각과 요크의 자로 길이 및 단면적은 구조별 형상에 맞게 적용하였다.

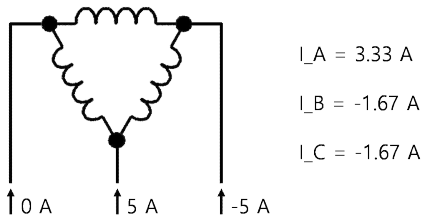
비교 대상은 1상 4각, 3상 3각 및 3상 5각 철심 구조로 선정하였다. 3상 3각 구조는 상대적으로 단순한 자속 경로를 가지는 반면, 1상 4각 및 3상 5각 구조는 추가적인 자기회로를 포함하므로 DC-Bias 전류 유입 시 자속 분산 특성에 차이가 발생할 수 있다.

〈표 1〉 변압기 사양

항 목	값
인가 전압 [kV]	32.5
주파수 [Hz]	60
권선 턴수	116
자속밀도 [T]	1.486

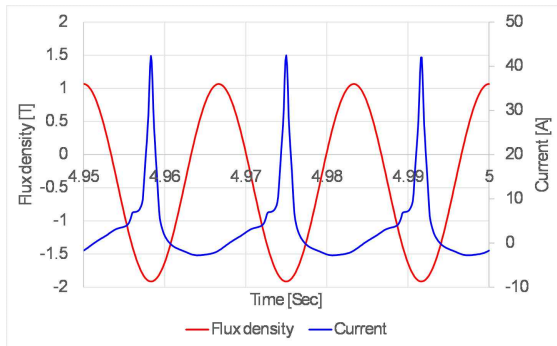
2.3 DC-Bias 전류에 따른 자계 특성 비교

해석에 사용된 DC-Bias 전류 조건은 그림 2와 같다. 본 논문에서는 밸브측 Line을 통해 총 5 A의 DC 전류가 유입되는 경우를 가정하였다. 이 경우 델타 결선된 밸브 권선의 전류 분배에 따라 A상 권선에는 +3.33 A, B상 및 C상 권선에는 각각 -1.67 A의 DC 전류가 흐르는 것으로 설정하였다. 이러한 전류 분포로부터 1상 변압기에서는 단일 권선의 DC 기자력이 철심 자속에 영향을 미치는 반면, 3상 변압기에서는 각 상 권선의 DC 기자력이 철심 및 요크를 통해 동시에 작용할 것으로 예상된다. 따라서 3상 구조에서는 상간 자속 결합에 의해 1상 구조와는 다른 DC-Bias 자계 특성이 나타날 수 있다.



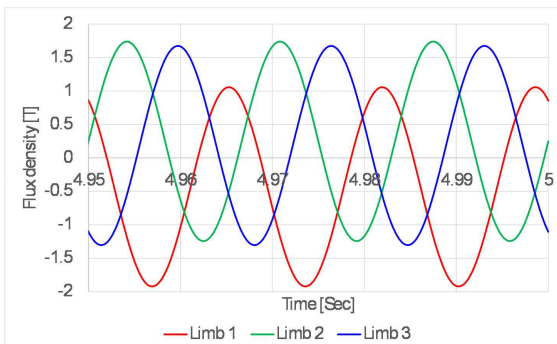
〈그림 2〉 DC-Bias 전류 인입 조건

그림 3은 DC-Bias 전류 조건에 따른 1상 4각 철심 구조의 주각 자속밀도 파형과 여자전류 파형을 나타낸 것이다. DC-Bias 전류가 유입되면 직류 기자력에 의해 주각의 자속밀도 파형이 한 방향으로 편차되며, 이에 따라 특정 반주기에서 자속밀도가 증가하여 포화 영역에 접근 또는 도달하는 것을 확인할 수 있다. 이로 인해 철심의 반주기 포화가 발생하며, 여자전류는 대칭적인 교류 파형에서 벗어나 특정 반주기에서 급격히 증가하는 비대칭 파형으로 나타난다. 이러한 결과는 DC-Bias 전류가 철심의 자속 동작점을 이동시켜 자속밀도 증가와 여자전류 왜곡을 유발함을 보여준다.



〈그림 3〉 DC-Bias 조건에서의 1상 4각 철심 자속밀도 및 여자전류 파형

그림 4는 DC-Bias 전류 조건에 따른 3상 3각 철심 구조의 주각 영역 자속밀도 파형을 비교한 것이다. Y결선 중성점을 통해 유입되는 지자계유도전류의 경우 각 상 권선의 DC 전류 방향이 동일하게 형성되며, 이때 DC 자속은 주로 외부 공극을 포함하는 경로를 통해 순환하므로 큰 자기저항에 의해 철심 내부의 자속밀도 증가가 제한된다.



〈그림 4〉 DC-Bias 조건에서의 3상 3각 철심 자속밀도 파형

반면 HVDC 시스템과 같이 밸브측 Line을 통해 DC 전류가 유입되는 경우에는 상별 DC 전류의 방향이 서로 다르게 형성될 수 있으며, 이로 인해 철심 내부에 자속 순환 경로가 형성된다. 이 경우 자속 경로의 자기저항이 상대적으로 작기 때문에 DC-Bias 전류에 의한 자속밀도 증가가 크게 나타날 수 있다. 그림 4에서도 DC 전류 유입에 따라 주각 영역의 자속밀도가 증가하고 파형이 편차되는 것을 확인할 수 있으며, 이는 3상 3각

철심 구조도 HVDC 시스템의 DC-Bias 조건에서는 포화에 취약할 수 있음을 보여준다.

표 2는 DC-Bias 전류 변화에 따른 철심 구조별 주각 및 요크의 최대 자속밀도를 비교한 것이다. 3상 3각과 3상 5각의 주각 자속밀도를 비교하면, DC-Bias 전류가 인가된 조건에서 3상 5각의 주각 자속밀도가 3상 3각보다 소폭 높게 나타났다. 이는 3상 5각 구조의 경우 외측각에 의해 추가적인 병렬 자기 경로가 형성되어 DC 기자력에 대한 등가 자기저항이 감소하고, 이에 따라 철심 내부에서 DC 자속이 보다 쉽게 형성되었기 때문으로 판단된다.

반면 요크 자속밀도의 경우, 3상 5각은 DC-Bias가 없는 조건에서 3상 3각보다 높은 값을 보였으나, DC-Bias 전류 증가에 따른 자속밀도 증가량은 상대적으로 작게 나타났다. 이는 주각에서 형성된 자속의 일부가 외측각을 포함한 병렬 자기 경로로 분산되면서, 주각과 연결된 요크 영역의 자속 증가가 완화되었기 때문으로 판단된다.

또한 1상 4각과 3상 5각 철심의 주각 자속밀도를 비교하면, 동일한 DC-Bias 전류 조건에서 1상 4각의 주각 자속밀도 증가량이 상대적으로 작게 나타났다. 이는 1상 4각 철심의 경우 단일 권선에서 발생한 DC 기자력에 의해 자속 편중이 형성되는 반면, 3상 5각 철심에서는 각 상 권선에서 발생한 DC 기자력이 공통 철심 및 요크를 통해 동시에 작용하기 때문으로 판단된다. 즉, 3상 철심 구조에서는 상별 DC 기자력의 상호 결합 효과가 존재하므로 1상 구조에 비해 주각 자속밀도 증가가 다소 크게 나타날 수 있다.

〈표 2〉 DC-Bias 전류 변화에 따른 철심 자속밀도 비교

DC [A]	1상 4각		3상 3각		3상 5각	
	주각	요크	주각	요크	주각	요크
0	1.489	1.785	1.489	1.489	1.489	1.760
2	1.826	1.815	1.871	1.869	1.899	1.814
5	1.913	1.818	1.921	1.916	1.940	1.816

3. 결 론

본 논문에서는 전압원 전기회로와 비선형 등가자기회로를 연성한 시간 영역 해석을 통해 HVDC 변환용 변압기의 DC-Bias 전류 유입에 따른 철심 구조별 자계 특성을 비교하였다. 해석 결과, DC-Bias 전류는 철심의 자속밀도 파형을 한 방향으로 편중시키고 특정 반주기에서 자속밀도 증가와 여자전류 왜곡을 유발하였다. 철심 구조별로는 3상 5각의 주각 자속밀도가 3상 3각보다 소폭 높게 나타났으나, 외측각에 의한 자속 분산으로 요크의 자속밀도 증가량은 상대적으로 작게 나타났다. 또한 1상 4각은 단일 권선의 DC 기자력만 작용하여 3상 구조보다 주각 자속밀도 증가량이 작게 나타났다. 따라서 HVDC 변환용 변압기 설계 시 DC 전류 유입 경로, 권선 결선 및 철심 구조에 따른 자속 분포 특성을 함께 고려할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기후에너지환경부(MCEE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. RS-2025-25462747)

[참 고 문 헌]

- [1] "Effects of DC Bias on power transformers", CIGRE Technical Brochures, Ref. 944, Nov. 2024
- [2] J. Raith, "Risk Assessment of Power Transformers under the Influence of Geomagnetically Induced Currents (GIC)", Doctoral Thesis, Graz University of Technology, Oct. 2019