

2[MVA] 배전용 몰드변압기의 과도전계해석에 관한 연구

(A Study on the Transient Analysis of 2[MVA] Mold Transformer for Electric Field)

전문호* · 김창엽**

(Mun-Ho Jeon · Chang-Eob Kim)

Abstract

This paper presents the electric field for 22.9[kV]/380[V], 2[MVA] mold transformer are analysed using FEM(finite element method). The electric field was calculated for the voltage applied to the transformer. Then, it is analysed that the maximum electric field occurred between high voltage turns. Capacitance is calculated with energy method. Surge impulse test simulation is studied by modeling circuit with capacitance and inductance. This paper obtain the result that is about influence of electric field in distribution mold transformer adopted.

Key Words : Mold transformer, Electric Filed, Electrostatic Capacity, FEM

1. 서 론

변압기는 전기 에너지를 변성하여 효율적인 전력공급을 하는 기기이다. 대도시화와 인구의 밀집으로 인한 국부적 전력 수요의 급격한 증가는 도시 주변의 대용량 전력시설을 요구하고 있다. 이에 따라 변압기 역시 고압 및 대용량, 전력설비의 소형화가 이루어지고 있다. 이런 이유로 몰드변압기의 사용이 증가하고 있으나, 안전성과 신뢰성 특히 옥내설비의 경우에 불연성과 저소음 등이 요구되어진다[1]. 몰드변압기의 사용이 증가함에 따라 열화 및 부분방전 등에 의한 사고나, 송전선의 낙뢰 등에 의한 충격전압, 사고 시 이상

전압 발생 등의 요인으로 인한 권선간 전압이 불균등하게 된다. 이러한 현상은 주로 권선에 분포되는 인덕턴스와 정전용량에 의해 지배된다. 이상전압 및 충격전압이 몰드변압기에 인가되었을 때 해석하는 기법으로 권선간의 정전용량과 인덕턴스를 계산하여 등가회로를 구성하여 해석하는 방법이 있다. 하지만 이런 해석방법은 몰드변압기 자장분포는 해석하지 못하는 단점이 있다.

본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 2[MVA] 몰드변압기의 전계해석과, 권선간 정전용량을 일반식과 회로에 포함하여 해석하였다. 전계 분석은 수치해석틀인 Flux를 이용하여 2차원 및 3차원 해석을 하였다. 정전용량은 에너지법을 사용하여 각 권선 간의 정전용량을 구하고, 권선의 인덕턴스를 계산하여 뇌임펄스 내전압에서의 과도해석을 하였다. 과도해석으로부터 각 권선에 걸리는 전압으로 전계해석을 수행하였다.

* 주저자 : 호서대학교 대학원 전기공학과 졸업

** 교신저자 : 호서대학교 전기공학과 교수

Tel : 041-540-5667, Fax : 041-540-5668

E-mail : cekim@hoseo.edu

접수일자 : 2010년 8월 20일

1차심사 : 2010년 8월 26일

심사완료 : 2010년 10월 13일

2. 몰드변압기 전계해석

2.1 해석 모델

해석 모델은 22.9[kV]/380[V], 2[MVA] 배전용 몰드 변압기로 선정하여 전장계 해석프로그램인 Flux를 사용하여 해석하였다. 그림 1은 해석 모델인 배전용 몰드변압기의 전체 외형도이다. 2차원 해석은 3상중 한 상만을 고려하였고, 3차원은 3상 모두를 구현하여 해

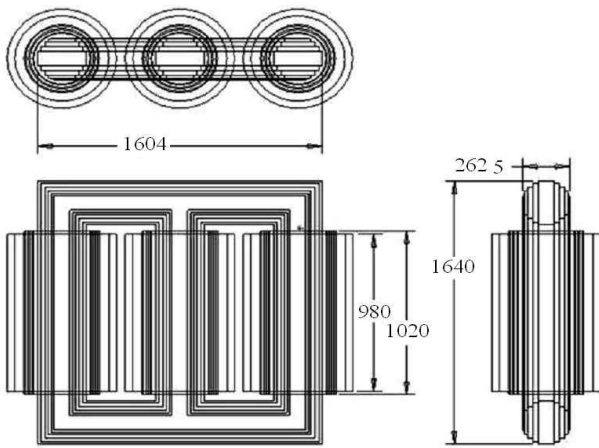


그림 1. 2[MVA] 몰드변압기 외형도
Fig. 1. Outline of 2[MVA] mold transformer

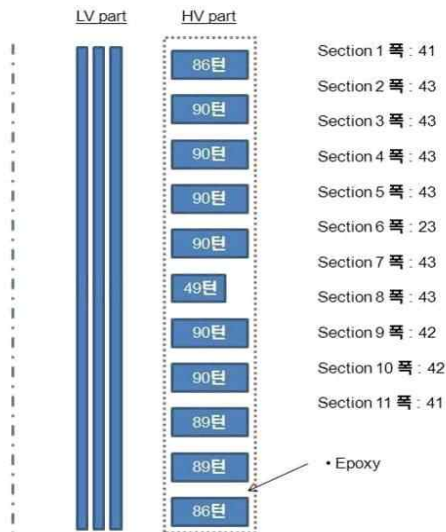


그림 2. 변압기 코일의 상세 단면도
Fig. 2. Detail section of transformer coil

석하였다. 코일의 배치는 고압측과 저압측으로 구분되며, 고압측 코일은 11개의 섹션으로 총 939턴이고, 에폭시로 몰딩되어 있다. 저압측은 3개의 섹션으로 총 9턴이며, 역시 에폭시로 몰딩되어 있다. 코일의 재질은 알루미늄 박판이며, 턴과 턴 사이에는 PET필름으로 절연되어 있다. 철심은 자속밀도 1.85[T]의 이방성을 가진 규소강판 30PG120이다. 그림 2는 변압기 코일의 상세 단면도를 나타낸다.

2.2 정상상태 해석

정상상태 해석을 위해 몰드변압기 고압측 코일에 22.9[kV], 저압측 코일에 380[V]의 전압을 인가하여 2차원과 3차원 해석을 수행하였다. 그림 3은 2차원 전

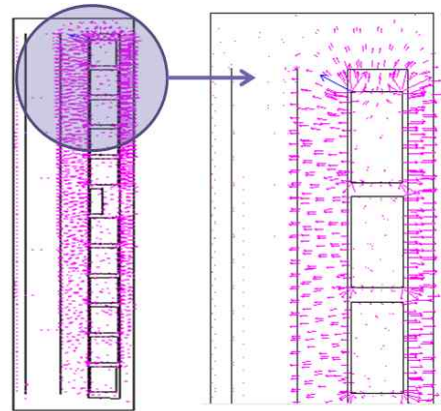


그림 3. 정상상태 2차원 전계해석
Fig. 3. 2D analysis of electric field for steady state

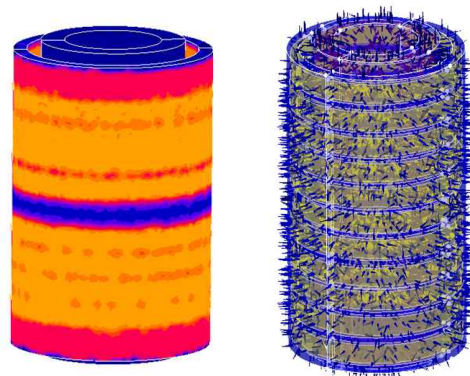


그림 4. 정상상태 3차원 전계해석
Fig. 4. 3D analysis of electric field for steady state

계해석에 대한 결과이고, 그림 4는 3차원 전계해석 결과이다. 해석 결과 고압 측 코일 첫 번째 섹션 부근에서 가장 큰 전계가 걸리는 것을 확인하였다. 2차원 해석에서는 첫 턴과 에폭시 사이에서 1.85[kV/mm]의 최대전계가 발생하고, 3차원 해석 결과 1.69[kV/mm]로 나타났다. 2차원과 3차원 결과는 거의 근사한 값을 가지는 것을 확인하였다.

2.3 정전용량계산

몰드변압기는 낙뢰나 사고 및 고장 등에 의해 뇌 임펄스전압, 서지 전압, 이상전류 또는 고장전류 등의 흐름에 의해 권선 간의 전압이 불균일하게 걸리게 된다. 특히 몰드변압기의 경우 복잡한 구조를 가지고 있기 때문에 최대한 전계가 집중되지 않게 설계되어야 한다. 전계가 집중되면 집중된 부분에서 부분방전이 발생할 수 있고 크랙이 발생하기 때문이다. 권선간 전압이 불균등해지는 현상은 권선 간에 분포 되어 있는 인덕턴스와 정전용량에 의해 일어난다[2]. 정전용량은 절연된 도체 사이에 전위를 주었을때 전하를 축적하는 양으로 나타나며, 두 장의 극판간 용량은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다. 또한 그림 5와 같은 동축도체일 경우엔 식(2)와 같이 정전용량을 계산할 수 있다.

$$C = \frac{Q}{V} = \epsilon \left(\frac{A}{t} \right) \tag{1}$$

여기서 ϵ : 극판간의 물질의 비유전율, A : 극판의 면적, Q : 전하, V : 전압이다.

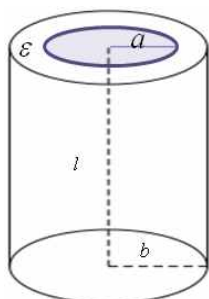


그림 5. 동축도체
Fig. 5. Coaxial conductor

$$C = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \tag{2}$$

여기서 l : 동축도체의 길이, a : 내부 도체의 반경, b : 외부 도체의 내경이다.

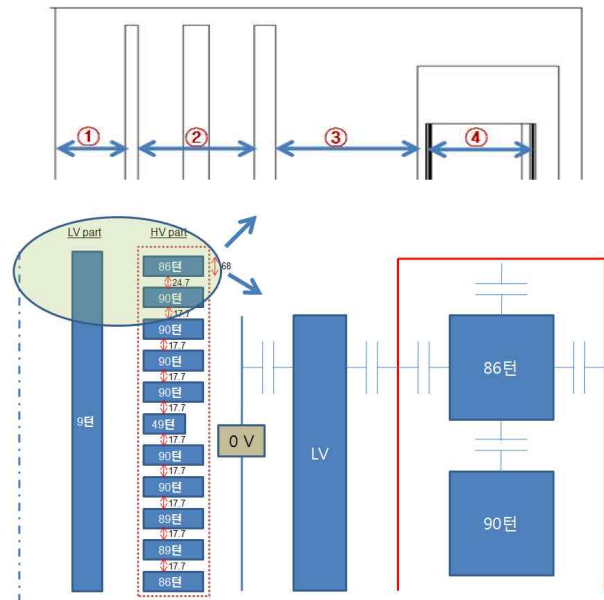


그림 6. 과도해석을 위한 정전용량계산
Fig. 6. Calculation result of capacitance

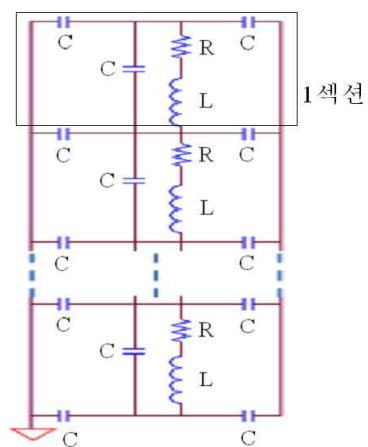


그림 7. 과도해석을 위한 회로도
Fig. 7. Equivalent circuit for transient analysis

본 논문에서는 권선 간의 정전용량과 각 권선의 인덕턴스를 계산하고, 등가회로를 구성하여 해석하였다.

그림 6은 과도전계해석을 위한 첫 번째 섹션부근을 나타낸 것이다. 여기서 ①~④는 각각 코아와 저압사이, 저압과 저압사이, 저압과 고압사이, 고압측 턴사이의 위치를 나타낸다. 이것을 과도해석을 위한 회로로 만들면 그림 7과 같다[3-4].

정전용량은 식 (3)과 같이 에너지법을 이용하여 계산하였다.

$$W = \frac{1}{2} QV \quad (3)$$

여기서 W 는 에너지[J], Q 는 커패시터에 축적되는 전하량[C], V 는 커패시터 양단간의 전위차[V]이다. 정전계 해석으로는 정전용량의 값을 산출 할 수 없기 때문에 각 부분에서의 전계 에너지 값을 구하여 그 값을 에너지법에 대입하여 계산하였다. 계산 결과 몰드 변압기 위치별 정전용량은 표 1과 같고, 고압 코일의 11개 섹션과 저압코일의 3개 섹션, 코일에 몰딩 되어 있는 에폭시에서의 정전용량 값은 표 2와 같다.

표 1. 몰드변압기 위치별 정전용량
Table 1. Calculation results of partition capacitance

	위 치			
	코아-저압	저압-저압	저압-고압	고압측 턴사이
정전용량 [nF]	0.012	0.023	0.69	0.58

2.4 과도해석

해석을 위해 구간별 정전용량을 대입하여 등가회로를 구성하여야 한다. 연구에 사용된 몰드변압기는 권선과 권선 사이에 자계가 형성되고, 유전율이 있으므로 극판 콘덴서의 구조처럼 보이지만 다른 형태의 구조를 가진다. 본 논문에서는 첫 섹션에서의 턴과 턴 사이, 섹션과 섹션사이를 구분하여 해석하였다. 절연 물은 에폭시로 4.2의 유전율을 적용하였다. 정전용량 값은 각각의 섹션과 첫 섹션에서의 턴 마다 입력하여 등가회로도를 그림 8과 같이 구성하였다. 결론은 3상

Δ -Y로 하였으며, 고압측 권선저항은 한 상당 1.1897 [Ω], 저압측은 0.000356[Ω]이다. 각 권선은 저항과 인덕턴스로 구성되며, 인덕턴스는 flux를 사용하여 구할 수 있고, 식 (4)를 이용하여 계산할 수도 있다[5].

표 2. 몰드변압기 부분별 정전용량
Table 2. Calculation results of sectional capacitance

	고압측 코일 [μF]	저압측 코일 [μF]
섹션 1	0.694	0.087
섹션 2	0.741	0.065
섹션 3	0.741	0.108
섹션 4	0.741	-
섹션 5	0.741	-
섹션 6	0.322	-
섹션 7	0.741	-
섹션 8	0.741	-
섹션 9	0.729	-
섹션 10	0.729	-
섹션 11	0.694	-
에폭시	0.209	0.086

$$L = \frac{0.8r^2N^2}{6r+9l+10d} \quad (4)$$

여기서 r 는 코일의 평균반지름, l 은 코일의 총 길이, N 은 코일회수, d 는 코일의 두께이다.

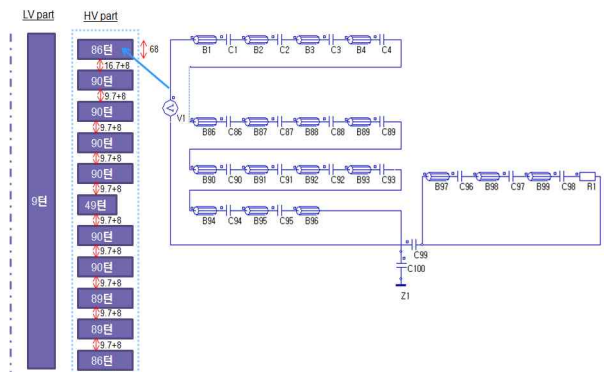
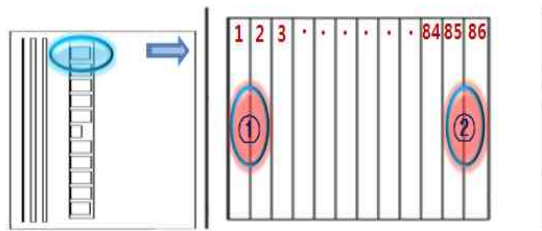
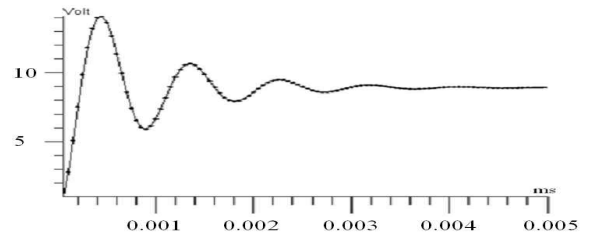


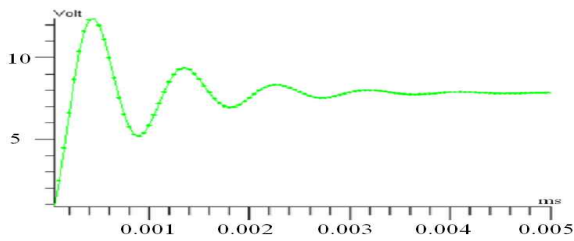
그림 8. 몰드변압기 등가회로
Fig. 8. Equivalent circuit of mold transformer



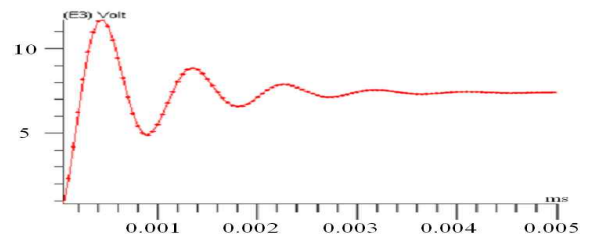
(a) 1번 섹션에서의 상세 단면도



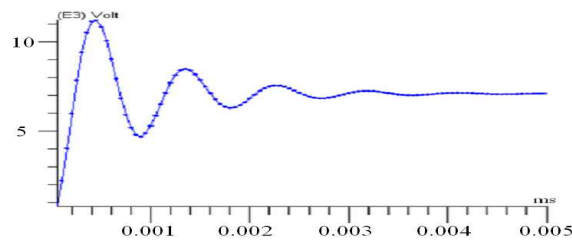
(b) 1턴과 2턴 사이 - ①



(c) 85턴과 86턴 사이 - ②



(d) 1섹션과 2섹션 사이



(e) 10섹션과 11섹션 사이

그림 9. 1차 전압 95[kV]에서의 과도해석
Fig. 9. Transient analysis at primary voltage 95[kV]

그림 9는 뇌 임펄스 내전압 95[kV]가 인가되었을 때 코일에 걸리는 전위를 시간에 따라 과도 해석한 결과이다. 그림 9 (a)는 1번 섹션에서의 상세 단면도로 턴과 턴 사이에는 PET필름으로 절연되어 있다. (b)와 (c)는 고압 코일의 1번 섹션에서의 턴 사이에서 걸리는 전압을 나타낸 것으로 (a)는 1턴과 2턴 사이에 걸리는 전압으로 최대 140[V]이고 수렴되는 전압은 85[V]이다. (b)는 85턴과 86턴 사이에 걸리는 전압으로 최대 125[V]이고, 수렴되는 전압은 79[V]이다. 그림 9의 (d), (e)는 섹션 사이에 걸리는 전압으로 (d)는 1번과 2번 섹션에서의 전압으로 최대 11,618[V], 수렴 전압은 7,318[V]이며, (e)는 10번과 11번 섹션사이에 걸리는 전압으로 최대 11,312[V], 수렴전압은 7,117[V]

이다. 또한 뇌 임펄스 내전압 95[kV]가 인가되었을 때 최대 전계의 세기는 8.12[kV/mm]로, 첫 번째 섹션 코일과 에폭시 사이에서 발생하였다.

그림 10은 회로에 FEM으로 얻은 정전용량값을 회로에 대입하여 해석한 결과이다. 각각의 권선간 전압 강하를 보면 거의 비슷하게 발생하는 것을 볼 수 있다. 본 논문에서의 배전용 폴드변압기에 사용된 에폭시 허용 전계강도는 35-40[kV/mm]이고, PET필름은 20[kV/mm]이다. 이것은 해석한 결과보다 약 50[%]보다 크다. 따라서 본 연구에 사용된 폴드변압기 모델은 컴팩트화 할 수 있을 것으로 사료된다. 하지만, 폴드변압기의 기계적 강도, 열, 제작공정 등 다른 설계요인을 만족하여야 할 것이다.

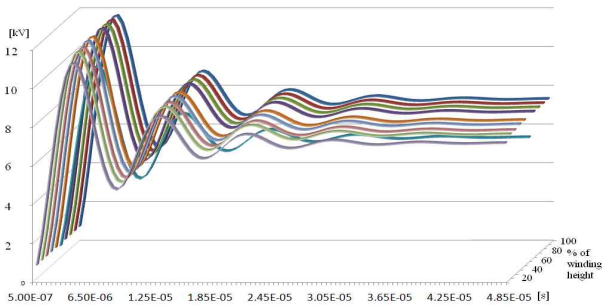


그림 10. 섹션별 과도해석
Fig. 10. Transient analysis of sectional transformer

3. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 사용하여 2[MVA] 몰드변압기의 전계해석과, 권선간의 정전용량을 일반식과 회로에 포함하여 해석하였다. 전계 분석은 Flux를 이용하여 2차원 및 3차원 해석을 하였고, 에너지법을 통하여 각 권선 간의 정전용량을 구하고, 권선의 인덕턴스를 계산하여 뇌 임펄스 내전압에서의 과도해석을 하였다. 뇌 임펄스가 권선에 유입 되었을 때 초기 전압 분배 데이터로부터 변압기 절연성능을 사전에 예측할 수 있을 것이다. 또한 본 연구에 사용된 배전용 몰드변압기는 기계적 강도, 열, 제작공정 등의 설계요인을 만족하면 콤팩트화 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 2008년 호서대학교 학술연구조성비로 수행된 결과임.

References

- [1] Linden W. Pierce, "Specifying and Loading Cast-Resin Transformers", IEEE, Trans. Industry Applications, vol.29, no.3, pp.590-599, 1993.
- [2] Bjorn Kallberg, "Location of Partial Discharges in Power Transformers by Computation and Measurement of Capacitively Transmitted Voltage Pulses", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.99, no.2, pp.589-596, 1980.
- [3] S.V.Kulkarni, S.A.Khaparde, "Transformer Engineering", MARCEL DEKKER, INC, 2004.
- [4] 이준호, 이기식, "유한요소법에 의한 변압기의 돌입전류 계산", Journal of The Korean Magnetics Society, vol.9, no.1, 1999.
- [5] J & P transformer Book (Twelfth edition), NEWNES, 1998.

◇ 저자소개 ◇



전문호 (全汶鎬)

1976년 12월 11일생. 2002년 2월 호서대학교 전기공학과 졸업. 2004 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 8월 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).



김창업 (金昌業)

1960년 1월 1일생. 1983년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1990년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983~1997년 (주)효성중공업기술연구소 책임연구원. 200년 8월~2010년 8월 Duke University Visiting Ccholar. 1997년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.

University Visiting Ccholar. 1997년~현재 호서대학교 전기공학과 교수.