



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

負荷變化에 따른 3相 變壓器의 3次元 有限要素解析



2017年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

崔 仁 錫

工學碩士 學位論文

負荷變化에 따른 3相 變壓器의 3次元 有限要素解析



指導教授 朴 瀚 錫

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2017 年 2月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

崔 仁 錫

이 論文을 崔仁錫의 工學碩士
學位 論文을 認准함

2016 年 12 月

主審 工學博士 禹 炅 一 (印)

委員 工學博士 朴 昶 炫 (印)

委員 工學博士 朴 瀚 錫 (印)

목 차

Abstract	ii
제 1 장 서 론	1
제 2 장 변압기	2
2.1 기본특성	2
2.2 이상적인 변압기	4
2.3 극성 판정	9
2.4 실제적인 변압기	11
2.5 전압 변동율	17
2.6 효율	20
2.7 3상 변압기	23
제 3 장 유한요소법	29
3.1 유한요소법 개요	29
3.2 유한요소해석 정식화	32
제 4 장 특성해석 결과 및 고찰	36
4.1 3상 변압기의 제원	36
4.2 특성 해석 결과	37

제 5 장 결 론	40
참고문헌	41



3D finite element analysis of 3 phase Transformer according to Load Variation

In-Seok, Choi

Department of Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Pukyong National University

Abstract

A transformer ideally changes one ac voltage level to another voltage level without affecting the actual power supplied. If a transformer steps up the voltage level of a circuit, it must decrease the current to keep the power into the device equal to the power out of it. Therefore, ac electric power can be generated at one central location, its voltage stepped up for transmission over long distances at very low losses, and its voltage stepped down again for final use. Because a transformer has series impedances within it, the output voltage of a transformer varies with the load even if the input voltage remains constant.

This paper describes on the characteristic analysis of 3 phase transformer according to load variation. The 3D finite element analysis was used to find out the characteristics of voltage, current and magnetic flux density. It is shown that the magnitudes and the phases secondary voltages and the magnetic flux densities were unbalanced according to the load variation.

제 1 장 서 론

변압기는 회전기가 아닌 고정기로서 에너지 변환 장치는 아니지만 많은 에너지 변환 계통에서 필수적이고 공통 자기 회로에 의해 결합된 2 개 이상의 전기 회로를 갖는 간단한 장치이며 광범위하게 사용되고 있다. 변압기의 첫 번째 기능은 전압 크기를 변화시키는 것이며, 한 회로와 다른 회로를 분리시킬 경우 또는 저전력 전자 회로나 제어 회로에 널리 사용된다. 이러한 변압기는 고출력에 사용되는 철심 변압기와 저출력에 사용되는 공심 변압기로 나눌 수 있다.

변압기의 2 차측에 접속되는 대부분의 부하는 일반적으로 일정 전압에서 동작하도록 설계되어 있다. 그러나 변압기에 전류가 흐르게 될 때 변압기의 내부 임피던스로 인한 전압 강하 때문에 부하 단자 전압이 변하게 되고 부하의 상태에 따라 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다. 이러한 전압 변화는 변압기 내부 임피던스의 전압 강하에 영향을 받는다. 부하가 클 때 전압의 변화가 크다면 바람직하지 않으며 전압 강하를 줄이기 위해서는 변압기의 내부 임피던스가 작도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 3상 변압기의 부하 변동에 따른 출력 특성을 해석한다. 특성 해석을 위하여 정확성이 높은 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하고, 부하 변동에 따른 전압, 전류 특성을 해석한다. 그리고 불평형 부하 구동에서 발생하는 특성을 알아보기 위하여 저항 부하를 사용하여 불평형 부하 구동시 발생하는 전류 및 자속밀도의 특성을 해석한다.

제 2 장 변압기

2.1 기본 특성

변압기는 공통 자기 회로에 의해 결합된 2 개 이상의 전기 회로를 갖는 간단한 장치이다. 빈틈없이 연결하거나 높은 자속밀도를 얻기 위해서는 강자성체의 철심이 이용되고 있다. 이러한 변압기를 철심 변압기라고 하며 고출력용에 많이 사용되고 있다. 공심 변압기는 자기 회로에서 자속의 결합율이 낮으므로 저출력 전자 회로에 사용된다.

철심 구성의 2 가지 형태는 일반적으로 그림 2.1 과 같다. 그림 2.1a 의 내철형은 권선이 사각 철심의 두 다리 주위에 감겨져 있다. 외철형은 그림 2.1b 와 같이 권선이 3 개의 철심 다리 중 중간 다리의 주위에 감겨져 있다. 철심의 손실을 줄이기 위해 철심은 얇은 강판을 성층하여 이루어져 있다. 두께 0.014 인치의 규소강판은 일반적으로 수백 Hz 이하의 주파수에서 작용하는 변압기에 사용된다. L 형 성층 강판은 내철형에 사용되고 E 형 성층 강판은 외철형에 사용된다. 큰 여자 전류가 필요한 공극을 없애기 위해 그림 2.1c 와 2.1d 의 형태로 강판이 교대로 성층된다. 고주파 (수백 ~ 수 MHz) 와 저출력의 통신 회로에 사용되는 작은 변압기에는 퍼멀로이 (permalloy, 철-니켈 합금) 라고 알려진 강자성체의 합금을 분말 압축하여 사용한다.

2 개의 권선으로 구성된 변압기의 회로도 는 그림 2.2 와 같다. 2 개의 수직 철심은 권선 사이를 단단하게 결합한 상태를 나타낸다. 한쪽 권선은 교류 전원 공급측에 연결되어 있으며, 1 차 권선 (primary winding) 이라 한다. 다른 권선은 전기 부하에 연결되어 있으며 2 차 권선 (secondary

winding) 이라 한다. 권선수가 많은 선은 고전압이 인가되어 고전압 (HV, high voltage) 권선이라 하며 권선수가 적은 권선은 저전압 (LV, low voltage) 권선이라 한다. 그림 2.1a 와 같이 권선 사이의 자속의 결합도를 높이기 위해서는 다른 권선 위에 한 권선이 놓이도록 코일을 감거나 그림 2.1b 와 같이 1 차 코일과 2 차 코일이 나란히 놓이도록 코일을 감는다. 다른 권선 위에 한 권선이 놓이도록 코일을 감은 경우 저전압 권선을 철심에 가까운 쪽에 놓고 고전압 권선은 먼 쪽에 놓는다.

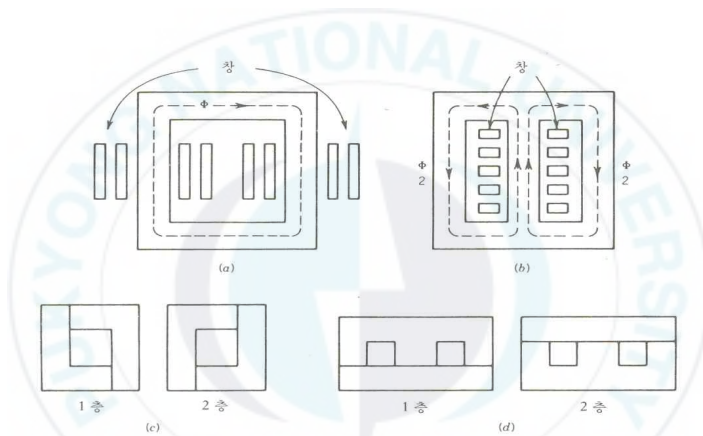


그림 2.1 변압기 철심 구조. (a) 내철형, (b) 외철형, (c) L-성층형, (d) E-성층형.

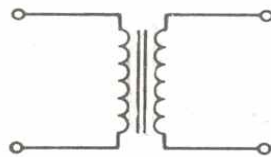


그림 2.2 2 권선 변압기의 설명도

변압기는 광범위하게 사용된다. 변압기의 첫 번째 기능은 전압 크기를 변화시키는 것이다. 전력은 발전소에서 대략 30,000 V 로 발전되며 가정에

서는 110 V 또는 220 V 로 사용된다. 전력은 발전소에서 부하 중심지역 으
로 전압의 크기 200,000 V 로부터 500,000 V 로 전송된다. 그림 2.3 과 같
은 변압기는 전력 전송이 여러 단계의 송배전 계통을 통과할 때 전압을 승
압 또는 강압하는 데 사용된다. 변압기는 한 회로와 다른 회로를 분리시킬
경우, 또는 최대 전력을 전달하는 경우, 전원측과 부하측의 임피던스가 일
치할 경우 저전력 전자 회로나 제어 회로에 널리 사용된다. 또한 변압기는
전압과 전류를 측정하는 경우에도 사용된다. 이러한 변압기를 계측 변압기
라 한다.

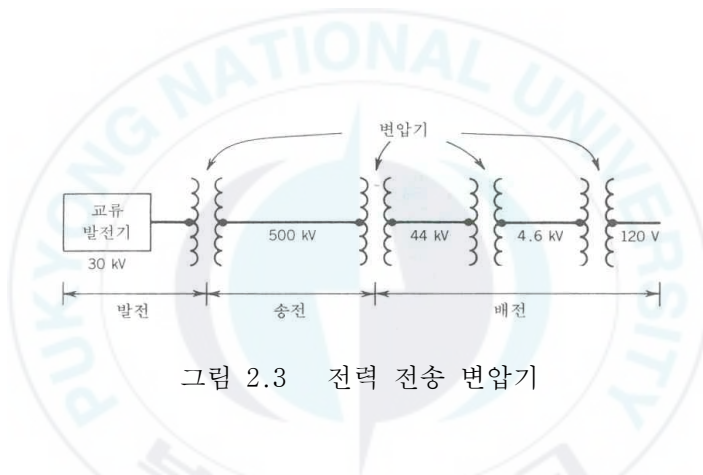


그림 2.3 전력 전송 변압기

2.2 이상적인 변압기

변압기의 실제 등가회로를 유도하기 위해서 이상적인 변압기가 먼저 고
려되어야 한다. 그림 2.6 은 1 차 권선의 수 N_1 , 2 차 권선의 수 N_2 로 구
성된 변압기의 단면도이다. 단면도에서 실제 변압기에서는 권선들이 교대
로 되어 있지만 철심의 2개 다리에 2 개의 권선을 나타내는 것은 일반적인
관례이다. 이상적인 변압기는 다음과 같은 특성을 갖는다고 가정하자.

1. 권선 저항은 무시한다.
2. 모든 자속은 철심을 통과하고, 양 권선과 쇄교한다. 즉, 누설자속 및

철손은 무시한다.

3. 철심의 투자율은 무한대이다. 따라서 철심에 자속을 발생시키기 위한 여자 전류는 무시해도 좋다. 즉 철심에 자속을 발생시키기 위한 순기자력은 0이다.

1 차 권선이 교류 전압 v_1 에 연결될 때 시변 자속 Φ 는 철심에 형성된다. 권선 저항을 무시하면 전압 e_1 이 권선에 유도되고 이 유도 전압은 공급 전압과 같다.

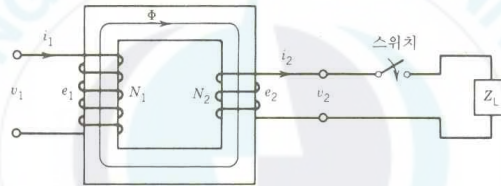


그림 2.6 이상적인 변압기

$$v_1 = e_1 = N_1 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

철심을 통과하는 자속은 역시 2 차 권선과 쇄교하므로 전압 e_2 가 유도된다. 이 유도 전압 e_2 는 단자 전압 v_2 와 같다.

$$v_2 = e_2 = N_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.2)$$

식 (2.1) 과 (2.2) 로부터

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.3)$$

여기에서 a 는 권선비이다.

식 (2.3) 은 이상적인 변압기에서 1, 2 차 권선의 전압은 1, 2 차 권선의 권선수와 비례함을 의미한다.

그림 2.6 에서 스위치를 닫아 2 차 권선에 부하를 연결해 보자. 전류 i_2 가 2 차 권선에 흐르면 2 차 권선측의 기자력은 $N_2 i_2$ 가 될 것이다. 이것은 기자력 $N_1 i_1$ 이 $N_2 i_2$ 와 서로 같아져서 자속의 변화가 발생하지 않도록 1 차 권선에 순간적으로 전류 i_1 이 흐르도록 한다. 두 권선 전류에 의해 발생하는 두 기자력의 방향은 서로 반대가 된다(그림 2.6). 이상적 철심에서 자속이 통과하기 위한 순기자력은 0 이므로

$$\text{순기자력} = N_1 i_1 - N_2 i_2 = 0 \quad (2.4)$$

$$N_1 i_1 = N_2 i_2 \quad (2.5)$$

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.6)$$

권선에 흐르는 전류의 비는 권선비와는 반비례한다. 또한 많은 전류가 부하에 흐르면 역시 많은 전류가 전원에서 변압기로 공급된다. 식 (2.5) 에서 1, 2 차의 기자력이 같다는 것은 2 차 전류의 크기를 1 차측에서도 측정할 수 있음을 의미한다.

식 (2.3) 과 (2.6)에서

$$v_1 i_1 = v_2 i_2 \quad (2.7)$$

이 식은 변압기의 순간 입력과 순간 출력이 서로 같음을 뜻한다. 이것은 이상 변압기에서 모든 전력 손실을 무시하였기 때문이다.

전원 전압 v_1 이 정현파이면 식 (2.3), (2.6) 과 (2.7) 은 실효치로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = a \quad (2.8)$$

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a} \quad (2.9)$$

$$V_1 I_1 = V_2 I_2 \quad (2.10)$$

2.2.1 임피던스 변환

그림 2.7(a) 는 이상적인 변압기의 회로도로서 1 차측에서는 정현파 전압이 인가 되었고, 2 차측에는 부하 임피던스 Z_2 가 연결되었다. Z_2 는,

$$Z_2 = \frac{V_2}{I_2}$$

입력 임피던스 Z_1 은

$$\begin{aligned} Z_1 &= \frac{V_1}{I_1} = \frac{a V_2}{I_2/a} = a^2 \frac{V_2}{I_2} \\ &= a^2 Z_2 \end{aligned} \quad (2.11)$$

따라서

$$Z_1 = a^2 Z_2 = Z_2' \quad (2.12)$$

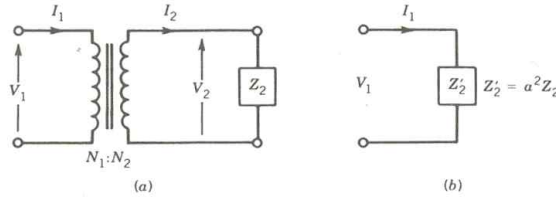


그림 2.7 이상 변압기의 임피던스 변환

2 차측에 연결된 임피던스 Z_2 는 1 차측에서 본 임피던스 Z_2' 로 표현할 수 있으므로 그림 2.7(b) 의 회로와 그림 2.7(a) 의 회로는 등가 관계가 있다. 임피던스 값은 권선비의 제곱(a^2) 을 곱하면 2 차측에서 1 차측으로 본 임피던스 변환이 이루어진다. 또한 1 차측에서 본 임피던스를 2 차측에서 본 임피던스로의 변환도 가능하다. 이러한 경우는 권선비의 제곱으로 나누면 된다. 즉

$$Z_1' = \frac{1}{a^2} Z_1 = Z_2 \quad (2.13)$$

이러한 임피던스 변환은 전기 회로에서 변압기의 결합 상태가 제거되어 회로가 간단해지므로 아주 유용하다.

2.3 극성 판정

변압기나 다른 전기 기기의 권선에는 극성을 단자에 표시한다. 그림 2.8(a) 와 같이 2 개의 권선을 생각하면 단자 1 과 3 으로 흘러들어가는 전류가 공통적인 자기 경로의 철심에서 동일한 방향으로 자속이 흐르므로 같은 극성을 이룬다. 다시 말해서 변압기의 1차측은 1차측 전원에 대해서 부하역할을 하는 것이고, 변압기의 2차측은 2차측의 부하에 대해서 전원 역할을 하는 것이다. 부하에 대해서는 전류가 + 방향으로 흘러 들어가고 전원에서는 + 단자에서 전류가 흘러나오게 된다. 마찬가지로 단자 2 와 4 도 같은 극성의 단자이다. 만일 두 권선이 공통적인 시변자속과 쇄교하면 표시된 것이 같은 극성의 전압이 유기될 것이다. 또 만일 임의의 순간에 단자 1 의 전위가 단자 2 에 대하여 양 (+) 이라 하면 같은 순간에 단자 3 의 전위는 단자 4 에 대해서 양 (+) 이 될 것이다. 다시 말하면 유기 전압 e_{12} 와 e_{34} 는 같은 위상이다. 단자 1 과 3 또는 2 와 4 가 동일 극성의 단자일 경우 그림 2.8(b) 와 같이 점 (dot) 또는 $\pm$ 로 표시된다. 이러한 것을 권선의 극성 표시라 한다. 이러한 극성 표시는 권선이 철심에 어떻게 감겨져 있는가를 나타낸다.

만일 전기 기기 내의 권선을 눈으로 볼 수 있다면 극성들을 결정할 수 있다. 그러나 일반적으로 권선의 단자만이 기계 밖으로 나와 있으므로 실험에 의해서 권선의 극성을 결정할 수 있다. 간단히 결정하는 방법은 그림 2.8(c) 에 나타나 있다. 여기서 단자 2 와 4 는 공통으로 연결되어 있고 권선 1 과 2 는 교류 전원이 연결되어 있다. 단자 1-2, 3-4 와 1-3 사이의 전압을 전압계로 측정한다. 이들 전압을 각각 V_{12} , V_{34} , V_{13} 라고 하자. 만일 전압계의 측정값 V_{13} 가 V_{12} 와 V_{34} 의 합과 같다면($V_{13} \simeq V_{12} + V_{34}$) 순

시적으로 단자 1 의 전위가 단자 2 에 대해 양 (+) 이고 단자 4 의 전위는 단자 3에 대해 양 (+) 임을 뜻한다. 그림 2.8(c) 같이 유기 기전력 e_{12} 와 e_{43} 는 $e_{13} = e_{12} + e_{43}$ 로 되어 동일 위상이다. 결과적으로 단자 1 과 4 는 같은 극성이다. 만일 전압계 측정 전압값 V_{13} 가 V_{12} 와 V_{34} 의 차 ($V_{13} \simeq V_{12} - V_{34}$) 와 같다면 단자 1 과 3 은 같은 극성의 단자이다.

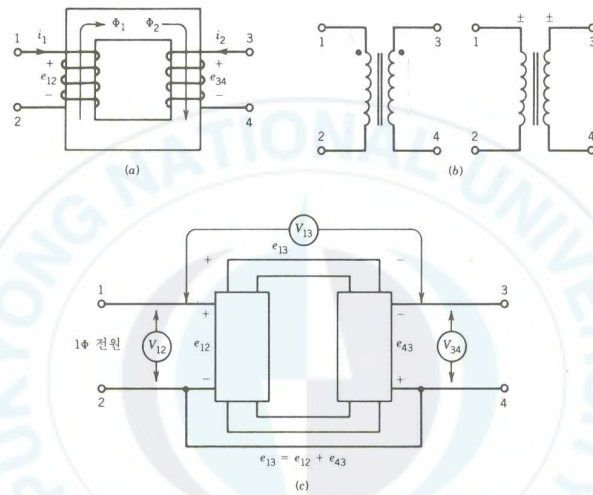


그림 2.8 극성 판정

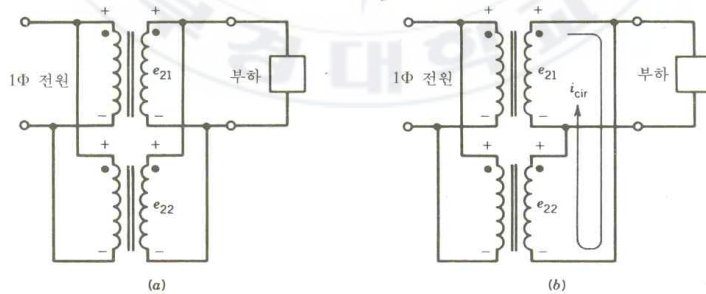


그림 2.9 단상 변압기의 병렬 운전. (a) 바른 결선, (b) 잘못된 결선.

변압기가 공통적인 부하에 대해서 병렬로 연결되었다면 권선의 극성도 알 수 있다. 그림 2.9(a) 는 단상 변압기 2 개가 병렬로 연결된 것을 나타낸다. 이것은 2 차 전압 e_{21} 과 e_{22} 가 내부적으로 서로 반대 극성이므로 바

르게 연결된 결선이다. 그림 2.9(b) 는 잘못 연결된 결선이다. 왜냐하면 내부적으로 e_{21} 과 e_{22} 가 서로 합쳐져 큰 순환 전류 i_{cir} 가 권선에서 흐르게 되어 변압기에 위험을 줄 수도 있기 때문이다.

2.4 실제적인 변압기

실제적인 변압기에서는 이상적인 변압기의 가정은 유효하지 못하다. 예를 들면 실제적인 변압기 권선에는 권선 저항이 있고, 모든 권선이 같은 크기의 자속과 쇄교하지 않으며, 철심 재료의 투자율은 무한대가 아니다. 또한 철심 재료에 시변 자속이 흐르면 손실이 발생한다. 실제적인 변압기를 해석하는 경우에는 이러한 모든 단점이 고려되어야 한다.

변압기를 해석하기 위한 2 가지 방법은 이상 변압기와의 차이를 설명하는 데 이용될 수 있다.

1. 물리적인 관점에 기초를 둔 등가 회로 모델
2. 자기적 결합 회로의 고전적인 이론에 기초를 둔 수학적 모델

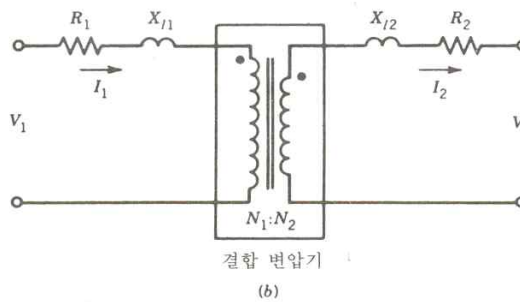
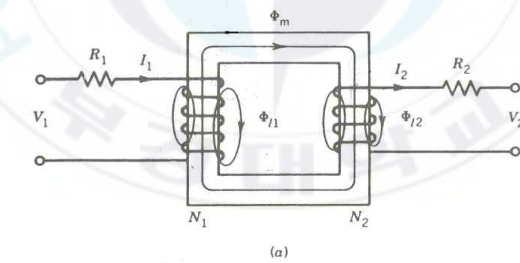
실제적인 변압기의 권선에는 저항이 분포되어 있으나 변압기 회로에는 그림 2.10(a) 와 같이 집중 저항으로 권선에 직렬로 연결되어 있다. 전류가 변압기 권선에 흐를 때 철심에 통과하는 상호 자속 Φ_m 을 형성하게 된다. 그러나 작은 양의 누설 자속 Φ_l 은 한쪽 권선만 쇄교하고 다른 쪽 권선은 쇄교하지 않는다. 누설 자속의 경로는 주로 공기 중이므로 누설 자속은 전류에 따라 선형적으로 변한다. 누설 자속에 의한 영향은 다음과 같은 누설 인덕턴스로 설명할 수 있다.

$$L_{l1} = \frac{N_1 \Phi_{l1}}{i_1} = \text{권선 1의 누설 인덕턴스}$$

$$L_{l2} = \frac{N_2 \Phi_{l2}}{i_2} = \text{권선 2의 누설 인덕턴스}$$

그림 2.10(b)와 같이 전기 저항 R 과 누설 리액턴스 $X_l (=2\pi fL_l)$ 에 의해 권선 저항과 누설 자속에 의한 영향을 설명할 수 있다.

실제 권선에서 흐르는 자화 전류 I_m 은 일정한 투자율을 갖는 철심 내에서 자속을 만든다. 이러한 자속은 자화 인덕턴스 L_m 으로 나타낼 수 있다. 물론, 철심 재료에 의한 철손은 저항 R_c 로 나타낼 수 있다. 만일 이러한 단점들을 모두 고려한다면 그림 2.10(c)와 같이 실제적인 변압기의 회로 내부에는 이상적인 변압기가 포함된다. 그러므로 실제적인 변압기의 등가 회로는 이상적인 변압기에 손실부분을 합친 것이다.



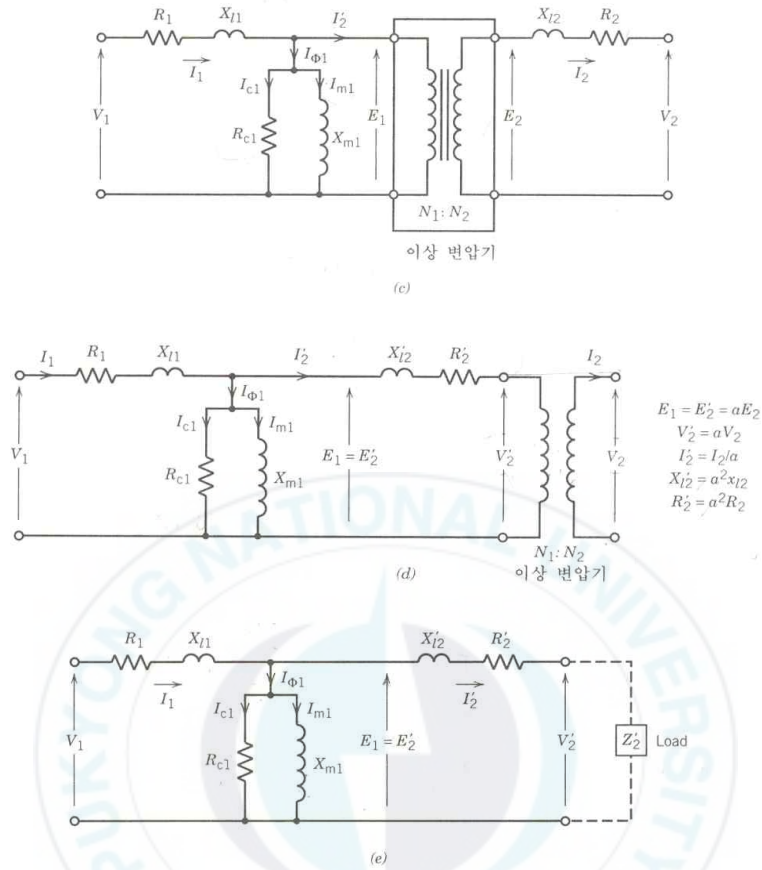


그림 2.10 변압기의 등가 회로 변환

2.4.1 등가 회로

그림 2.10(c) 에서 이상적인 변압기는 임피던스 변환을 이용하여 1 차측 또는 2 차측으로 이동할 수 있다. 이와 같이 이동할 경우 특성 차이는 거의 없다. 이상적인 변압기를 오른쪽으로 이동시켰을 때의 실제적인 변압기의 등가 회로가 그림 2.10(d) 이다. 그림 2.10(e) 는 실제적인 변압기의 2 차측을 1 차측으로 환산한 최종적인 등가 회로이다. 이때 계산된 변압기 상수들은 프라임 (') 으로 나타냈다. 이러한 등가 회로를 해석함으로써

여러 가지 특성을 계산할 수 있고 만일 권선비를 안다면 실제적인 값들은 결정 할 수 있다.

2.4.2 근사 등가 회로

일반적으로 그림 2.10(e)의 전압 강하 $I_1 R_1$ 과 $I_1 X_{l1}$ 은 작으므로 $|E_1| \simeq |V_1|$ 이다. R_{c1} 과 X_{m1} 으로 구성된 여자 회로는 그림 2.11(a) 처럼 전원측으로 이동될 수 있다. 여자 임피던스와 부하 임피던스는 공급 전원 양단에 직접 연결되기 때문에 이와 같은 근사 등가 회로는 전류 계산에 간편하다. 그 외 권선 저항과 누설 리액턴스는 집중 상수로 표시할 수 있다. 이러한 근사 등가 회로는 실제 변압기의 특성을 나타내는 데 자주 사용된다. 변압기에서 여자 전류 I_ϕ 는 변압기에 흐르는 전류에 비해 5% 이하로 아주 작다. 더욱 근사화 된 등가 회로는 그림 2.11(b) 와 같이 여자 회로가 제거된 회로이다. 2차측에서 본 등가 회로는 그림 2.11(c) 와 같다.

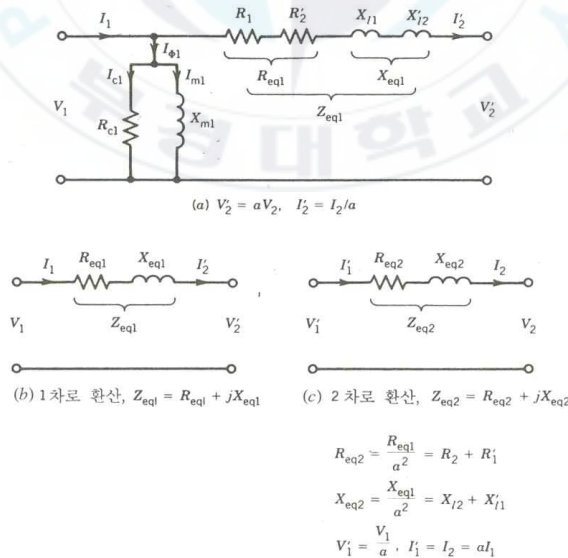


그림 2.11 근사 등가 회로

2.4.3 등가 회로 정수의 결정

실제적인 변압기에 대한 그림 2.10(e) 와 같은 등가 회로는 변압기의 동작을 미리 예상하기 위해서 사용된다. 등가 회로를 구성하기 위해서는 변압기 상수 $R_1, X_{l1}, R_{c1}, X_{m1}, R_2, X_{l2}$ 및 $a (= N_1/N_2)$ 를 알아야 한다. 만일 변압기의 완전한 설계 자료가 있다면 회로 상수들은 사용된 재료의 치수 및 특성으로 계산할 수 있다. 예를 들면, 권선 저항 (R_1, R_2) 은 동선의 고유저항, 길이, 권선의 단면적 등에 의해 구해진다. 자화 인덕턴스 L_m 은 권선의 권선수와 자기회로의 자기 저항에 의해 구해진다. 누설 인덕턴스 L_l 는 누설 자속 쇄교수를 고려하여야 하므로 복잡하게 계산된다. 그러나 이러한 방식으로 구해진 회로 상수의 값이 더욱 정확하다.

이러한 회로 상수는 전력 손실이 거의 없기 때문에 무부하 시험과 단락 시험을 통해 변압기 등가 회로의 회로 정수를 결정하게 된다.

- 무부하 시험

무부하 시험 (no-load test) 또는 개방 회로 시험 (open circuit test) 은 고전압측이나 저전압측에 전압을 가하여 실행한다. 그러므로 1100/110 V 용 변압기를 시험하려면 보다 쉽게 이용할 수 있는 110 V 전원 장치를 사용한다. 변압기의 무부하 시험을 위한 접속도는 그림 2.12(a) 와 같다. 여기서 2 차 권선측을 개방시켜야 한다. 그리고 그림 2.11(a) 의 변압기 등가 회로에서 개방 회로로 나타낸 등가 회로는 그림 2.12(b) 와 같다. 1 차측 전류는 여자 전류이고 전력계로 측정된 손실은 철손에 해당된다. 그림 2.12(b) 의 등가 회로는 회로 정수 R_c 와 X_m 이 전압계, 전류계, 전력계의 측정치로 결정됨을 나타낸다.

권선수가 작은 저전압측에 110 V 를 인가하든지 또는 권선수가 많은 고전압측에 1100 V 를 인가하든지 철손의 크기는 철심을 통과하는 자속이 같으므로 같다.

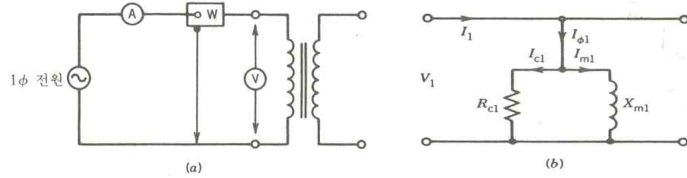


그림 2.12 무부하 시험. (a) 무부하 시험 접속도, (b) 무부하 시험 등가 회로

- 단락 회로 시험

단락 회로 시험 (short-circuit test) 은 그림 2.13(a) 와 같이 한 권선측을 단락시키고 다른 권선측의 전압을 변화시켜 정격 전류가 흐르도록 한다. 변압기에 대한 등가 회로 (그림 2.11(a))에서 여자 회로의 임피던스는 (R_c 와 X_m 으로 된 분류 회로) R_{eq} 와 X_{eq} 로 이루어진 그림 2.13(b) 의 직렬 회로의 임피던스보다 훨씬 크다. 만일 2 차 단자측을 단락시키면 분류 회로측의 높은 임피던스는 무시될 수 있다. 2 차측을 단락시킨 등가 회로는 그림 2.13(b) 와 같이 나타낼 수 있다. $Z_{eq} (= R_{eq} + jX_{eq})$ 는 작은 값이므로 권선에 정격 전류가 흐르기 위해서는 작은 전압을 가하여야 한다. 이러한 시험을 하기 위해서는 고전압 권선측에 전압을 가하는 것이 편리하다.

그림 2.13(b) 와 같이 회로 상수 R_{eq} 와 X_{eq} 는 전압계, 전류계 및 전력계의 계측값으로 결정된다. 설계가 우수한 변압기에서는 $R_1 = a^2 R_2' = R_2'$ 이고, $X_{l1} = a^2 X_{l2} = X_{l2}'$ 이다. 단락 회로 시험의 조건하에서 가해지는 전압은 작은 값이므로 철손은 무시될 수 있으며 전력계의 지시치는 R_{eq} 로 나타내

는 권선의 동손을 표시한다.

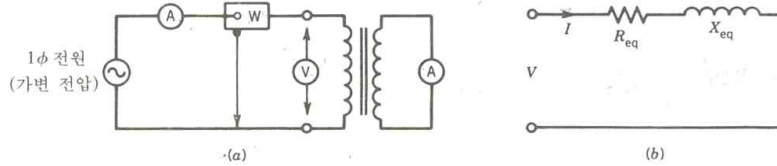


그림 2.13 단락 시험. (a) 단락 시험시 시험 접속도, (b) 단락 시험시 등가 회로

2.5 전압 변동률

변압기의 2 차측에 접속되는 대부분의 부하는 일반적으로 일정 전압에서 동작하도록 설계되어 있다. 그러나 변압기에 전류가 흐르게 될 때 변압기의 내부 임피던스로 인한 전압 강하 때문에 부하 단자 전압이 변하게 된다. 변압기를 직렬 임피던스 Z_{eq} 로 나타내면 그림 2.14(a) 와 같다. 만일 변압기에 부하가 연결되어 있지 않은 경우 (무부하) 부하 단자 전압은

$$V_2|_{NL} = \frac{V_1}{a} \quad (2.14)$$

지금 부하 스위치가 닫혀 변압기 2 차측에 부하가 연결되었다면 부하 단자 전압은

$$V_2|_L = V_2|_{NL} \pm \Delta V_2 \quad (2.15)$$

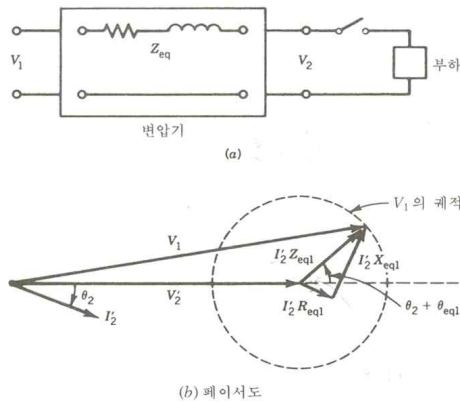


그림 2.14 전압 조정

부하의 상태에 따라 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다. 이러한 전압 변화는 변압기 내부 임피던스의 전압 강하에 영향을 받는다. 부하가 클 때 전압의 변화가 크다면 바람직하지 않다. 예를 들면 변압기 2 차측에 많은 전구를 연결하여 알아보기 쉬운 정도로 전압이 강하되었다면 전구의 불빛은 어두어질 것이다. 전압 강하를 줄이기 위해서는 변압기의 내부 임피던스 Z_{eq} 가 작도록 설계되어야 할 것이다.

전압 변동률은 부하를 갖는 변압기에 있어서 전압 변화의 특성을 나타내는 데 이용된다. 전압 변동률은 무부하에서 정격 부하까지 부하 전류의 변화에 대한 2 차 전압 크기의 변화로 정의할 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\varepsilon = \frac{|V_2|_{NL} - |V_2|_L}{|V_2|_L} \quad (2.16)$$

절대값 부호는 부하 특성에서 중요한 역할을 하는 전압 크기의 변화를 나

타낼 때 사용된다. 식 (2.16) 에서의 전압은 1 차측 또는 2 차측에서 본 등가 회로를 이용하여 계산할 수 있다. 식 (2.16) 은 그림 2.11(b) 에 나타난 1 차측에서의 등가 회로를 기준으로 하여 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\epsilon = \frac{|V'_2|_{NL} - |V'_2|_L}{|V'_2|_L} \quad (2.17)$$

부하 전압은 보통 정격 전압을 뜻한다. 그러므로

$$|V'_2|_L = |V'_2|_{rated} \quad (2.18)$$

그림 2.11b 로부터 1 차 전압은

$$V_1 = V'_2 + I'_2 R_{eq1} + jI'_2 X_{eq1} \quad (2.19)$$

만일 부하를 제거한다면 ($I_1 = I'_2 = 0$) V_1 은 V'_2 와 같아지므로

$$|V'_2|_{NL} = |V_1| \quad (2.20)$$

식 (2.17), (2.18) 과 (2.20) 으로부터 전압 변동률은 다음과 같이 정리된다.

$$\epsilon \text{ (in percent)} = \frac{|V_1| - |V'_2|_{rated}}{|V'_2|_{rated}} \times 100\% \quad (2.21)$$

전압 변동률은 부하의 역률에 따라 변화한다. 이것은 전압에 대한 페이서도로부터 설명할 수도 있다. 식 (2.19) 와 그림 2.11(b) 에 의해 그림 2.14(b) 와 같은 페이서도를 그릴 수 있다. 전압 V_1 의 궤적은 $|I_2' Z_{eq1}|$ 을 반경으로 하는 원이다. 전압 V_1 의 크기는 페이서 양 $I_2' Z_{eq1}$ 과 전압 V_2 이 같은 위상일 때 최대가 될 것이다. 즉

$$\theta_2 + \theta_{eq1} = 0 \quad (2.22)$$

여기서 θ_2 는 부하 임피던스의 각이고, θ_{eq1} 은 변압기 등가 임피던스 Z_{eq1} 의 각이다.

식 (2.22) 로부터

$$\theta_2 = -\theta_{eq1} \quad (2.23)$$

그러므로 최대 전압 변동률은 부하의 역률 각과 변압기 등가 임피던스 각이 같고 부하 역률이 지상일 때 발생한다.

2.6 효율

전원을 사용하는 장비들은 고효율로 동작하는 것이 바람직하다. 다행스럽게도 변압기의 손실률은 작다. 변압기는 고정기이므로 회전기에서 발생하는 풍손 및 마찰손이 없다. 바람직한 변압기의 효율 η 은 99% 정도이다. 효율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta = \frac{\text{출력 } (P_{out})}{\text{입력 } (P_{in})} \quad (2.24)$$

$$= \frac{\text{출력}}{\text{출력} + \text{손실}} \quad (2.25)$$

변압기의 손실은 철손 (core loss : P_c) 과 동손 (copper loss : P_{cu}) 으로 분류할 수 있다. 그러므로

$$\eta = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_c + P_{cu}} \quad (2.26)$$

동손은 권선 전류와 권선 저항에 의해 결정된다.

$$P_{cu} = I_1^2 R_1 + I_2^2 R_2 \quad (2.27)$$

$$= I_1^2 R_{eq1} \quad (2.28)$$

$$= I_2^2 R_{eq2} \quad (2.29)$$

동손은 부하 전류를 변수로 하는 함수이다.

철손은 철심 내의 최대 자속밀도에 따라 결정된다. 다시 말하면 변압기에 가해지는 전압에 따라 달라진다. 철손은 변압기에는 일반적으로 일정 전압이 가해지므로 거의 일정하고 무부하 시험에 의해 구할 수 있다. 그러므로 변압기 등가 회로의 회로 상수를 알게 되면 주어진 동작 조건하에서 변압기 효율이 결정된다. 출력 전력은 다음과 같이 정의된다.

$$P_{out} = V_2 I_2 \cos \theta_2 \quad (2.28)$$

따라서,

$$\eta = \frac{V_2 I_2 \cos \theta_2}{V_2 I_2 \cos \theta_2 + P_c + I_2^2 R_{eq2}} \quad (2.29)$$

부하 전압은 일반적으로 고정되어 있다. 그러므로 효율은 부하 전류 (I_2)와 부하 역률 ($\cos \theta_2$)에 따라 결정된다.

2.6.1 최대 효율

단자 전압 V_2 가 일정하고 부하 역률각이 θ_2 일 때 최대 효율은 다음 식 (2.30)을 만족시킬 때 나타난다.

$$\frac{d\eta}{dI_2} = 0 \quad (2.30)$$

만일 이러한 조건을 식 (2.29)에 적용하면 최대 효율 조건은 다음과 같다.

$$P_c = I_2^2 R_{eq2} \quad (2.31)$$

즉, 철손과 동손이 서로 같다. 전부하 조건은 다음과 같다.

$$P_{cu, FL} = I_{2, FL}^2 R_{eq2} \quad (2.31a)$$

$$X = \frac{I_2}{I_{2, FL}} = pu \text{ 부하} \quad (2.31b)$$

식 (2.31), (2.31a)와 (2.31b)로부터

$$P_c = X^2 P_{cu, FL}$$

$$X = \left(\frac{P_c}{P_{cu, FL}} \right)^{1/2} \quad (2.31c)$$

단자 전압 V_2 가 일정하고 부하 전류 I_2 일 때 최대 효율은 식 (2.32) 를 만족시킬 때 나타난다.

$$\frac{d\eta}{d\theta_2} = 0 \quad (2.32)$$

이러한 조건을 식 (2.29) 에 적용하면 최대 효율 조건은

$$\theta_2 = 0$$

$$\cos \theta_2 = 1$$

$$\text{즉, 부하 역률} = 1$$

따라서 변압기에서 최대 효율은 부하 역률이 1 이고 동손과 철손이 서로 같을 때 나타난다.

2.7 3상 변압기

3 상 계통은 큰 전기 에너지를 발전하고 송전하기 위해 사용된다. 3 상 변압기는 전력 전송의 여러 단계에서 전압을 승압, 강압하는 데 사용된다. 3 상 변압기는 다음과 같은 2 가지 방법 중 한 가지 방법을 택한다. 즉 3 개의 단상 변압기 뱅크를 적절히 결선하거나 공통적인 자기 철심에 3 상 변압기를 설계하는 방법이 있다.

2.7.1 3 개 단상 변압기 뱅크 (3 상 변압기 뱅크)

같은 단상 변압기 3 대를 한 조로 3 상 변압기를 구성하도록 결선한다. 1 차와 2 차 권선은 Y 혹은 Δ 형태로 결선한다. 따라서 3 상 변압기는 Y- Δ , Δ -Y, Δ - Δ , Y-Y 의 4 가지 결선이 가능하다. 그림 2.17(a) 는 3 상 변압기의 Y- Δ 결선을 나타낸다. 1 차측에서는 극성이 같은 3 단자가 Y 결선의 중성점과 연결되어 있다. 2 차측은 권선은 직렬로 접속한다. 이러한 결선을 나타내는 편리한 방법은 그림 2.17(b) 에서 설명하였다. 그림에서 나타난 1 차와 2 차 권선은 같은 형태의 3 대의 단상 변압기가 병렬로 접속되어 있다. 여기서 V 는 1 차측의 선간 전압이고 $a (= M_1/M_2)$ 는 단상 변압기의 권선비이다. 그 밖의 가능한 결선은 그림 2.17(c), (d), (e) 와 같다. 모든 가능한 결선에서 3 상 변압기의 총용량 kVA 가 각 변압기마다 균등하게 배분된다. 그러나 각 변압기의 정격 전압과 전류는 결선 방법에 따라 다르다.

Y- Δ : 이 결선은 일반적으로 고전압을 저전압으로 낮추는데 이용된다.

대부분의 경우 고전압측의 중성점을 접지하는 것이 바람직하다.

Δ -Y : 이 결선은 보통 전압을 승압할 때 이용된다.

Δ - Δ : 이 결선은 고장 수리를 하기 위해 한 변압기를 제거할 수 있고 나머지 2 대는 기본 뱅크 출력의 정격을 57.7% 로 감소시켜 3 상 전력을 전달할 수 있는 이점이 있다. 이러한 결선을 개방 델타 결선 (open-delta connection) 또는 V 결선이라고도 한다.

Y-Y : 이 결선은 여자 전류와 유기 기전력으로 인해 발생하는 문제 때문에 거의 이용되지 않는다.

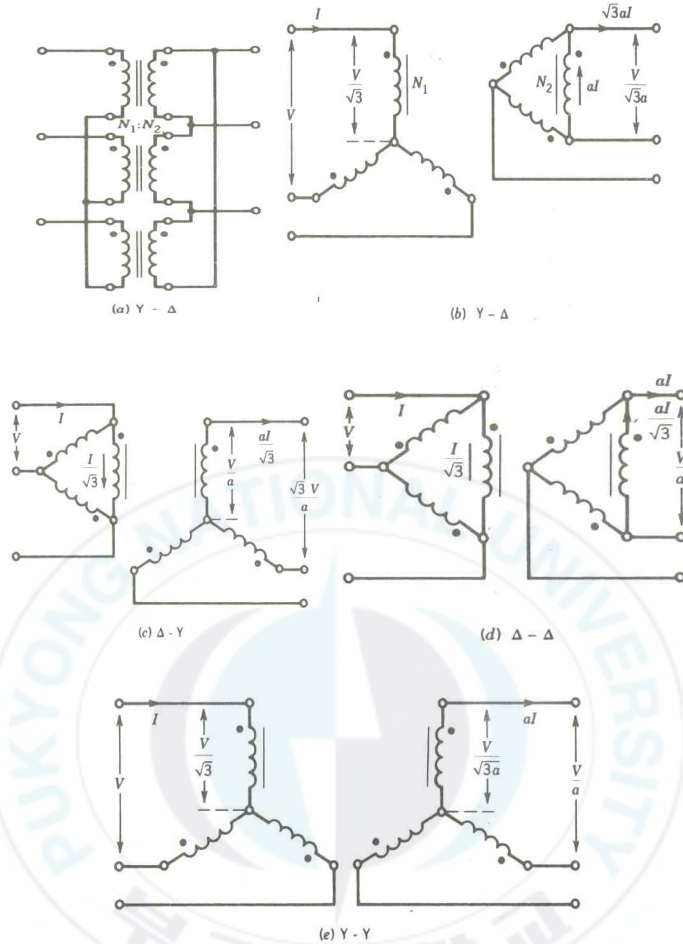


그림 2.17 3 상 변압기 결선

2.7.2 위상 천이

3 상 변압기 결선 중 Y-Δ 및 Δ-Y 는 1 차와 2 차 선간 전압 사이에 위상 천이 (phase shift) 가 일어나게 된다. Y-Δ 결선의 페이저 전압은 그림 2.18 과 같다. 페이저 V_{AN} 과 V_a 는 같은 방향이지만 1 차측의 선간 전압 V_{AB} 는 2 차측의 선간 전압 V_{ab} 보다 30° 위상이 앞선다. Δ-Y 결선 역시 선간 전압 사이에 30° 위상 천이가 있지만 Δ-Δ 와 Y-Y 결선은 선간 전압 사이에 위상 천이가 없다. Y-Δ 혹은 Δ-Y 결선에서 나타나는 이러한 위상

천이 특성은 다른 응용 분야에서는 장점으로 작용될 수 있다.

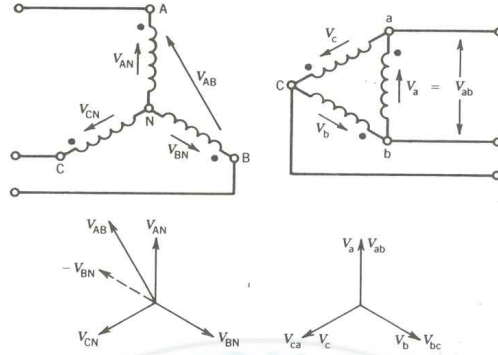


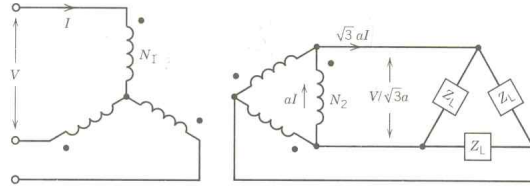
그림 2.18 3 상 변압기에서 선간 전압의 위상 천이

2.7.3 단상 등가 회로

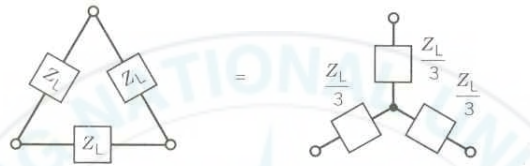
3 개의 변압기가 실제적으로 서로 같고 전원과 부하가 균형을 유지하면 1 차측과 2 차측의 전압, 전류도 평형을 이룬다. 한 상의 전압과 전류는 120 위상 변위가 있는 경우를 제외하고 다른 상의 전압, 전류와 같다. 그러므로 3 상 변압기 중 한 상의 해석할 경우 변압기 1, 2 차측에 대한 변수를 충분히 결정할 수 있다. 만일 모든 전원, 변압기 권선, 부하 임피던스가 Y 결선이라고 가정하면 단상 등가 회로는 쉽게 얻어지게 된다. 그림 2.19(b) 에 나타난 것처럼 잘 알려진 Y-△ 결선에 의해 △ 부하로부터 Y 부하를 구할 수 있다. 그림 2.19(c) 는 실제 회로의 등가 Y 결선을 나타낸 것이다. 여기서 1, 2 차 선전류와 선간 전압은 그림 2.19(a) 의 실제 회로의 선전류와 선간 전압과 서로 같다. 이러한 등가 Y-Y 변압기의 권선비 a' 은 다음과 같다.

$$a' = \frac{V/\sqrt{3}}{V/3a} = \sqrt{3}a \quad (2.39)$$

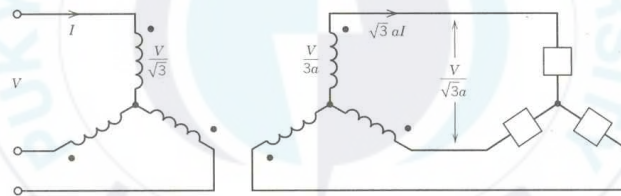
또한, 실제 변압기 뱅크에서 선간 전압비는



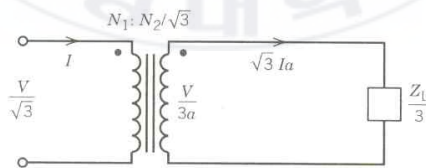
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2.19 3 상 변압기와 등가 회로

$$\frac{1 \text{ 차측 선간 전압}}{2 \text{ 차측 선간 전압}} = \frac{V}{V/\sqrt{3}a} = \sqrt{3}a \quad (2.40)$$

따라서 등가 단상 변압기의 권선비는 실제 변압기 뱅크 1 차와 2 차측의 선간 전압비이다. 단상 등가 회로는 그림 2.19(d) 와 같다. 변압기가 선로 (feeder) 를 통해 부하에 연결되거나 전력이 공급된다면 이러한 등가회로는 유용하게 사용될 것이다.



제 3 장 유한요소법

전동기의 정특성 및 동특성을 지배하는 방정식은 편미분 방정식으로 표현되므로 이를 정밀, 신속하게 해를 구해야만 한다. 수치 해석법의 경우 물리적으로 연속적인 형상을 갖는 제반의 형상들을 편미분 방정식으로 표현하여 유한개의 이산치 값을 구하는 방법으로 치환하여 푸는 방법이다[25].

3.1 유한요소법 개요

자연현상에 대한 수식적 표현은 계변수에 의해 특성화되는 경계치를 가지는 연속치 문제로서 볼 수 있으며 이는 계 전체를 지배하는 편미분 방정식으로 표현된다. 따라서 이와 같은 편미분 방정식을 만족하는 해를 구하면 그 해의 분포함수를 알 수 있다.

편미분 방정식의 해를 구하는 방법으로 계를 집중적인 정수로 보는 해석적인 방법과 분포계로 보는 수치해석적인 방법으로 나눌 수 있다. 해석적인 방법으로는 변수분리법이나 푸리에 급수에 기반을 둔 공간고조파법 등이 있으며 이를 이용하여 계의 지배방정식을 풀기 위해서는 많은 가정을 수반하여야 해석이 가능하므로 해의 정밀도가 낮고 모델에 따라서 해석식이 달라지므로 범용성에 제약을 가지고 있다.

반면에 수치해석적인 방법은 이러한 연속치 문제를 유한개의 이산 값을 가지는 대수방정식 문제로 치환하여 푸는 방법으로써 해석적 방법에 의해 해의 정밀도와 범용성 면에서 우수한 장점을 가지고 있으며 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 고속화, 대용량화, 저가격화가 실현되어 점차 관심이 증대되고 있다.

수치해석적인 방법으로는 여러 가지 있으나 해석모델의 복잡한 형상 및

재질의 비선형성 등을 처리하기가 비교적 용이한 유한요소법(FEM)이 많이 사용되고 있다. 유한요소법은 1950대 항공기의 기체강도를 계산하기 위한 구조역학 분야에 처음 도입되어 그 후 토목, 조선공학 등의 분야로 널리 확산되어 이용되었으며 특히 전기공학 관련 분야에서는 1960년대 후반부터 1970년대를 거쳐 지금까지 가장 널리 사용되고 있다.

유한요소법은 그 명칭에서 알 수 있듯이 대상물체 또는 영역을 유한한 크기를 갖는 부분영역(요소)으로 나누고, 각 영역에 대해 원래의 미분방정식으로부터 변분원리 또는 가중잔차법 등과 같은 방법을 이용하여 근사화시켜 얻어진 관계식을 개개의 요소에 적용하여 전 영역에 대한 유한개의 방정식을 구하고 이것의 미지수를 구하는 방법이다.

유한요소법을 이용하여 편미분방정식을 정식화하는 방법은 크게 두가지로 나눌 수 있는데 그 하나는 변분법으로서 임의의 포텐셜분포를 가정할 때 실제의 자연현상으로 존재하는 분포는 포텐셜 에너지가 최소로 되도록 한다는 자연법칙을 이용하는 방법이고, 또 하나는 Galerkin법으로서 계에서 에너지 범함수의 구성이 불가능한 경우에 그 계의 지배방정식을 구하면 가중잔차법의 원리에 의해 형상함수를 가중함수로 하여 근사해를 구할 수 있다.

유한요소법을 전기기기의 해석에 적용할 경우 전처리, 유한요소정식화, 풀이, 후처리의 순서로 이루어지며 각 단계를 설명하면 아래와 같다.

1. 해석문제의 정의 : 해석하고자 하는 현상에 대해 정의를 하고 그 계의 지배방정식을 유도한다. 이때에 해석방법(차원, 재료의 취급 및 구동함수 등)을 결정한다.

2. 전처리 : 해석문제가 정의되고 해석대상을 유한개의 영역으로 분할(요소분할 : Preprocess)한다. 이때 분할하는 요소의 종류는 시험함수와 각 절점의 자유도에 의해 결정된다. 일반적으로 2차원의 경우 3절점의 3각형 요소가 이용되고 3차원의 경우 8절점 6면체 요소가 많이 사용되고 있다. 요소의 절점이나 자유도에는 여러가지 조합이 있을 수 있으나 일반적으로는 1차원 요소를 사용하고 요소수를 늘리는 것이 해의 정확도면에서 유리한 것으로 알려져 있다.

3. 유한요소 정식화 : 요소의 형태를 정의하고 요소분할을 한 다음 각 요소에 대하여 요소방정식을 유도하여야 한다. 이때에 요소방정식은 변분원리 또는 가중잔차법을 사용하여 각 절점에 대한 선형 대수방정식을 유도하게 되는데 이것을 유한요소 정식화라고 한다. 각 요소방정식이 얻어진 후 각 요소방정식을 합하여 계전체에 대한 계 방정식을 유도하게 된다. 이때 얻어진 방정식은 미분방정식에서 선형대수 방정식으로 변환되기 때문에 컴퓨터를 사용하여 쉽게 해를 구할 수 있게 된다.

4. 후처리 : 유한요소 해석결과 얻어진 결과는 보통 미지수가 포텐셜이므로 여기서 바로 물리적인 의미를 도출해 내는 것은 어렵다. 따라서 구해진 포텐셜을 이용하여 물리적인 의미가 있는 다른 양을 계산하거나 또는 물리적인 의미가 있는 양들을 시각적으로 그래프 처리를 하는 과정을 후처리 과정이라고 한다. 자계해석에서 주로 얻고자 하는 물리적인 양은 자속밀도, 인덕턴스, 전자력이고 그래픽적으로 유용한 정보는 자속분포, 자속밀도 분포 및 힘 밀도 등이다.

3.2 유한요소해석 정식화

변위 전류를 무시 할 수 있는 준 정상상태에서, 임의의 해석 영역에 대한 Maxwell 방정식 및 보조방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o + \vec{J}_e \quad (3.1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} + \nabla \times (\vec{v} \times \vec{B}) \quad (3.2)$$

$$\nabla \times \vec{B} = 0 \quad (3.3)$$

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (3.4)$$

$$\vec{B} = \mu_0 (\vec{H} + \vec{M}) \quad (3.5)$$

$$\vec{M} = \chi \vec{H} + \vec{M}_r \quad (3.6)$$

여기서, $\vec{M}$ 은 자화량, χ 는 자화율, $\vec{M}_r$ 은 잔류 자화량이다. 식(3.4)를 식(3.2)에 대입하여 정리하고 $\vec{B} = \vec{\nabla} \times \vec{A}$ 의 관계를 이용하여 식(3.2)를 $\vec{H}$ 에 대해 정리하면 식 (3.7)과 같다.

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu} (\vec{\nabla} \times \vec{A}) - \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \quad (3.7)$$

식(3.7)을 식(3.1)에 대입하여 정리하면 다음식과 같다.

$$\vec{\nabla} \times \left(\frac{1}{\mu} \vec{\nabla} \times \vec{A} \right) = \vec{J}_o + \vec{J}_e + \vec{\nabla} \times \frac{1}{\mu_r} \vec{M}_r \quad (3.8)$$

전동기가 1차 철심의 적층방향으로 무한하다고 가정하면, 앞에서 전제한 가정과 같이 자기벡터 포텐셜 $\vec{A}$ 와 전류밀도 $\vec{J}$ 는 z 축 방향으로만 존재하게 된다. 또한, 잔류자화량 $\vec{M}_r$ 이 x, y 성분만 존재한다고 보면 식 (3.9)와 같은 자기벡터 포텐셜을 이용한 해석영역의 2계 편미분의 지배방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A_z}{\partial y^2} \right) = -J_o \\ + \sigma \frac{dA_z}{dt} - \frac{1}{\mu_r} \left(\frac{\partial M_{ry}}{\partial x} - \frac{\partial M_{rx}}{\partial y} \right) \end{aligned} \quad (3.9)$$

해석영역 각각의 요소에 대하여 자기벡터 포텐셜 A^e 를 1차 형상함수 N_{ie} 로 근사화 해서 가중잔차법을 위한 가중함수 N_{je} 를 도입하고 Galerkin법을 이용하여 잔차를 전영역에 대해서 적분하여 잔차를 영으로 하기 위해 각 요소에 대해 정식화하면 다음과 같은 식으로 전개된다.

$$\int_{s^e} \frac{1}{\mu} \sum_{i=1}^3 \left(\frac{\partial N_{ie}}{\partial x} \frac{\partial N_{je}}{\partial x} + \frac{\partial N_{ie}}{\partial y} \frac{\partial N_{je}}{\partial y} \right) A_{ie} dx dy \quad (3.10)$$

$$\begin{aligned}
& - \int_{s'} \frac{1}{\mu_r} \left(M_{rx}^e \frac{\partial N_{je}}{\partial y} - M_{ry}^e \frac{\partial N_{je}}{\partial x} \right) dx dy \\
& - \int_{s'} J_o N_{je} dx dy - \sigma \frac{d}{dt} \int_{s'} \sum_{i=1}^3 N_{ie} N_{je} A_{ie} dx dy = 0 \\
& (j = 1, 2, 3)
\end{aligned}$$

식 (3.10)의 요소방정식을 전요소에 대하여 조립하면, 식 (3.11)과 같은 각절점에 대한 자기벡터 포텐셜과 각 상전류에 대한 선형연립방정식을 얻게 된다.

$$[[S] - [C]] \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} [[T] [0]] \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} = [G] \quad (3.11)$$

여기서 [S] 는 절점의 위치와 투자율에 관계된 계수행렬, [C] 는 강제전류 밀도의 계수행렬, [T] 는 와전류밀도의 계수행렬, [G] 는 등가 자화전류밀도에 해당되는 구동 행렬을 나타낸다. 식 (31)은 방정식의 수보다 미지수가 3개(각 상전류에 해당) 더 많은 형태이므로 해를 구하기 위하여 다음에서 기술하는 각상에 대한 전압 방정식과 결합되어 진다.

각 절점의 자기벡터 포텐셜 [A]와 각 상의 권선에 흐르는 전류 $\vec{I}$ 를 미지수로 하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} [S] & -[C] \\ [0] & [R] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} [T] & [0] \\ I_{sk}[C]^T & [L_o] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{G\} \\ \{V\} \end{Bmatrix} \quad (3.12)$$

식 (3.12)의 시간미분항을 후퇴차분법을 이용하여 처리하여 식을 정리하면 식 (3.13)과 같은 회로방정식을 고려한 전체 시스템 방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & -[C] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o] + \Delta t [R]}{I_{stk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} = \begin{bmatrix} \frac{[T]^T}{\Delta t} & [0] \\ -[C]^T & -\frac{[L_o]}{I_{stk}} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_t + \begin{Bmatrix} \{G\} \\ \frac{\Delta t}{I_{stk}} \{V\} \end{Bmatrix}_{t+\Delta t} \quad (3.13)$$

제 4 장 특성해석 결과 및 고찰

4.1 3상 변압기의 제원

본 논문에서는 3상 변압기의 부하 변화에 따른 특성 해석을 위하여 3차원 유한요소법을 사용하였다. 그림 4.1은 3상 변압기의 3차원 모델을 나타내고 1차권선과 2차권선은 아래위로 배치하였다. 그리고 표 1은 3상 변압기의 제원을 나타낸다.

표 1. 3상 변압기 제원

1차 권선	50 턴/상
	0.031 Ω /상
2차 권선	5 턴/상
	0.00156 Ω /상
권선 결합	Δ - Δ
입력 전압 및 주파수	141 V
	60 Hz

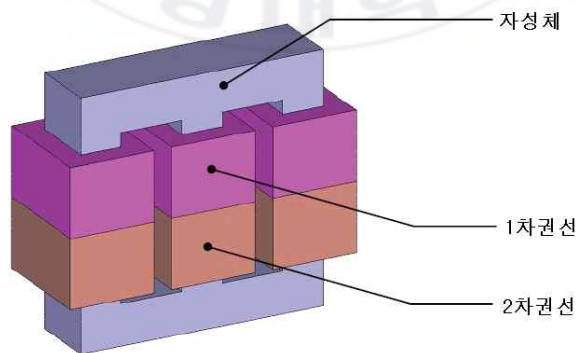


그림 4.1 3상 변압기의 3차원 단면도

4.2 특성 해석 결과

그림 4.2는 3상 변압기를 mesh한 그림을 나타낸다. 변압기의 각 다리와 권선에 해당되는 부분의 삼각형 요소의 크기는 매우 작고 상태가 조밀한 것을 알 수 있으며, 자속이 지나가지 않는 외부 영역의 삼각형 요소는 크기가 상대적으로 크게 나타남을 알 수 있다. 그림 4.3은 3상 변압기를 구동하기 위한 회로도를 나타낸다. FEM 영역은 각 1차권선과 2차권선을 나타내고 부하로 저항을 사용하였다.

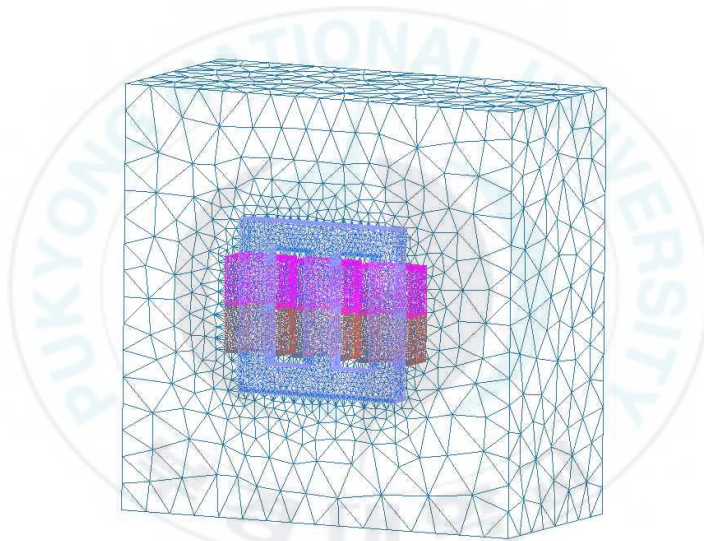


그림 4.2 3상 변압기 메쉬

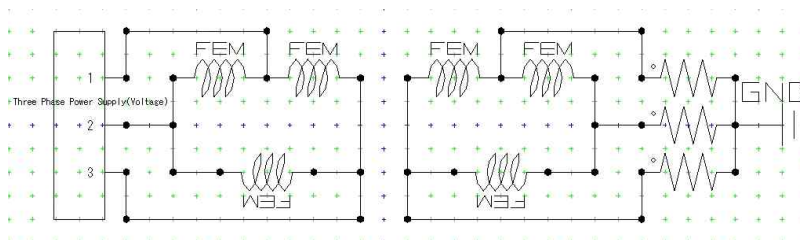


그림 4.3 3상 변압기 구동 회로

그림 4.4는 부하변화에 따른 2차 전압 특성을 나타낸다. 1차 전압이 141 V일 때 이상적인 2차 전압은 14.1 V로 나타난다. 그리고 부하 저항의 크기가 작아질수록 2차 전류의 상승으로 인하여 2차 전압의 크기에 변화가 발생함을 알 수 있다. 그림 4.5는 부하변화에 따른 2차 전압의 벡터도를 나타낸다. 2차 전압의 크기가 줄어들수록 2차 전압의 위상도 변화가 발생함을 알 수 있다.

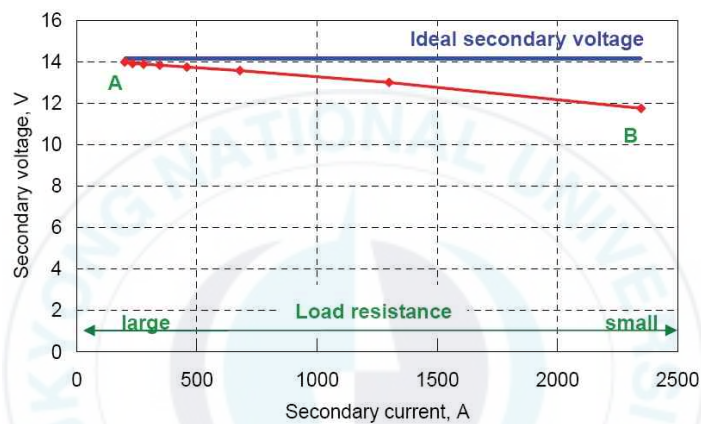


그림 4.4 부하변화에 따른 2차 전압 특성

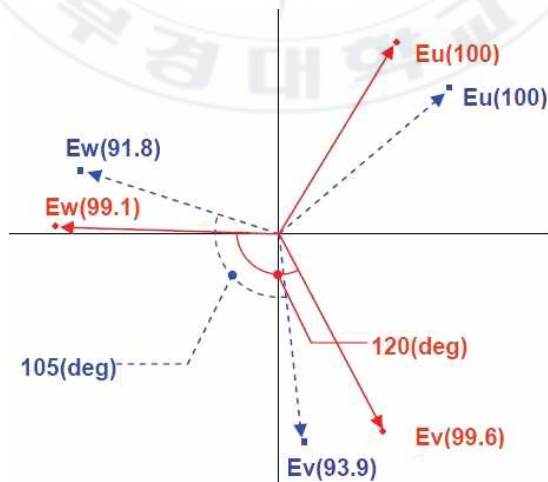


그림 4.5 부하 변화에 따른 2차 전압 벡터도

그림 4.6과 4.7은 균일 및 불균일 부하에 따른 변압기의 자속밀도 특성을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 균일 부하인 경우는 자속밀도의 특성이 균일하지만 불균일 부하인 경우는 자속밀도의 특성 또한 불균일하게 발생함을 알 수 있다.

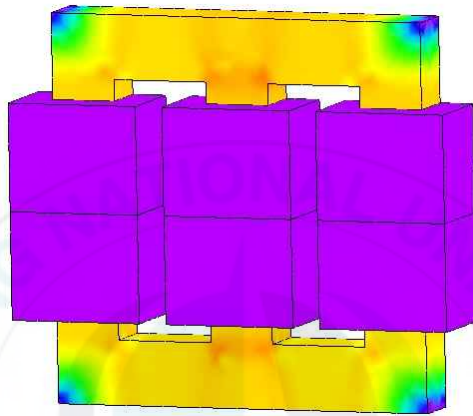


그림 4.6 균일 부하에 따른 자속밀도 특성

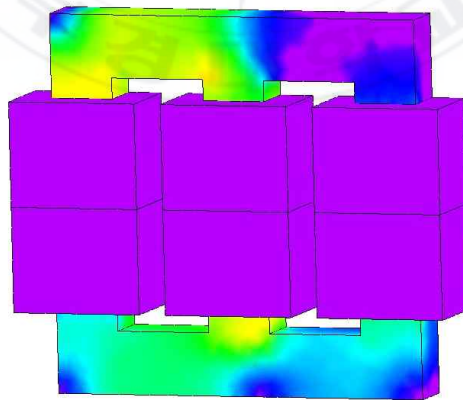


그림 4.7 불균일 부하에 따른 자속밀도 특성

제 5 장 결 론

변압기는 고정기로서 에너지 변환 장치는 아니지만 많은 에너지 변환 계통에서 필수적이고 공통 자기 회로에 의해 결합된 2 개 이상의 전기 회로를 갖는 간단한 장치로써 광범위하게 사용되고 있다. 변압기의 2 차측에 접속되는 대부분의 부하는 일반적으로 일정 전압에서 동작하도록 설계되어 있다. 그러나 변압기에 부하 전류가 흐르게 될 때 변압기의 내부 임피던스로 인한 전압 강하 때문에 부하 단자 전압이 변하게 되고, 이 부하 단자 전압은 부하의 상태에 따라 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다. 이러한 부하 전압 변화는 변압기 내부 임피던스의 전압 강하의, 특성에 영향을 받는다. 부하가 클 때 부하 전압의 변화가 크다면 바람직하지 않으며 전압 강하를 줄이기 위해서는 변압기의 내부 임피던스가 작도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 3상 변압기의 부하 변동에 따른 출력 특성을 해석하였다. 특성 해석의 정확성을 높이기 위하여 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하였고, 부하 변동에 따른 전압, 전류 특성 그리고 불평형 저항 부하에서 발생하는 전류 및 자속밀도 특성을 알아보았다. 해석 결과 부하 저항이 작아질수록 2차 전류가 증가해져 2차 전압의 크기 및 위상에 불균일 특성이 발생함을 알 수 있었다. 또한 전압의 불균일 특성으로 인하여 발생된 자속밀도의 특성도 불균일하게 나타남을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] M. J. Shenton, H. Herman, R. J. Heywood, and G. C. Stevens. "The use of spectroscopy with chemometrics to assess the condition and predict the lifetime of paper and oil used as transformer insulation," in *Dielectric Materials Measurements and Applications, 2000. Eighth International Conference on (IEE Conf. Publ. No. 473)*, 2000, pp.346-351.
- [2] J. P. Percherancier and P. J. Vuarchex, "Fourier transform infrared (FT-IR) spectrometry to detect additives and contaminants in insulating oils," *Electrical Insulation Magazine, IEEE*, vol. 14, pp. 23-29, 1998
- [3] O. Koreh, K. Torkos, M. Bashir Mahara, J. Boressay, and V. Izvekov, "Study of water clusters in insulating oils by Fourier transform infrared spectroscopy." *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 5, pp 896-902, 1998
- [4] F. R. van de voort, J. Sedman, R. Cocciardi, and S. Juneau, "An automated FTIR method for the routine quantitative determination of moisture in lubricants: An alternative to Karl Fischer titration," *Talanta*, vol. 72, pp. 289-295, 4/15/2007.
- [5] M. M. Hanada, M. A. A. Wahab, A. G. Zeitoun, and G. Ismail, "Infrared spectroscopy and ferrographic analysis of deposits in oil," in *High Voltage Engineering, 1999. Eleventh International Symposium on (conf. Publ. No. 467)*, 1999, 99. 356359 vol. 3.
- [6] A. Georgiev, I. Karamancheva, and L. Topalova, "Determination of oxidation products in transformer oils using FT-IR spectroscopy," *Journal of Molecular Structure*, vol. 872, pp.

18-23, 1/15/2008.

- [7] M. Ali, A. M. Emsley, H. Herman, and R. J. Heywood, "Spectroscopic studies of the ageing of cellulosic paper," *Polymer*, vol. 42, pp. 2893-2900, 2001.
- [8] Y. Liu, "Vibrational spectroscopic investigation of Australian cotton cellulose fibers: Part 1. A Fourier transform Raman study," *Analyst*, vol. 123, pp. 633-636, 1998.
- [9] H. H. Patrick J. Baird, Gary C. Stevens, "On-Site Analysis of Transformer Paper Insulation Using Portable Spectroscopy for Chemometric Prediction of Aged Condition," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 15, 9. 1089, 2008.
- [10] P. J. Baird, H. Herman, G. C. Stevens, and P. N. Jarman, "Spectroscopic measurement and analysis of water and oil in transformer insulation paper," *Dielectrics and Electrical Insulation, IEEE Transactions on*, vol. 13, 99. 293-308, 2006.
- [11] P. J. S. Baird, H. Herman, G. C. Stevens, "Non-destructive and in-situ analysis of insulating materials in high-voltage power transformers," in *Solid Dielectrics, 2004. ICSD 2004. Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on*, 2004, pp. 719-722 vol. 2.
- [12] M. Arshad and S. M. Islam, "Power transformer condition assessment using oil UV - spectrophotometry," in *Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2007. CEIDP 2007. Annual Report - Conference on*, 2007, pp. 611-614.
- [13] "Test Method for Determination of the Relative Content Of Dissolved Decay Products in Mineral Insulating Oils by

- Spectrophotometry,” *ASTM D6802 - 02(2010) Standard*, 2010.
- [14] N. A. Dakar, A. Abu-Siada, S. Islam, and M. F. El-Naggar, “A new technique to measure interfacial tension of transformer oil using UV-Vis spectroscopy,” *IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation*, vol. 22, pp. 1275-1282, 2015.
- [15] A. Abu-Siada, “Correlation of furan concentration and spectral response of transformer oil-using expert systems,” *Science, Measurement & Technology, IET*, vol. 5, pp. 183-188, 2011.
- [16] A. Abu-Siada, S. P. Lai, and S. M. Islam, “A Novel Fuzzy-Logic Approach for Furan Estimation in Transformer Oil,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 27, pp. 469-474, 2012.
- [17] S. P. Lai, A. Abu-Siada, S. M. and G. Lenco, “Correlation between UV-Vis spectral response and furan measurement of transformer oil,” in *Condition Monitoring and Diagnosis, 2008. CMD 2008. International Conference on*, 2008, pp. 659-662.
- [18] J. Workman Jr, “7-UV-VIS Spectroscopy Charts,” in *The Handbook of Organic Compounds*, ed Burlington: Academic Press, 2001, p. 63.
- [19] H. Kaur, *Spectroscopy*. Meerut, IND:Global Media, 2009.
- [20] ASTM, “Standard Test Method for Analysis of Gases Dissolved in Electrical Insulating Oil by Gas Chromatography,” *ASTM D3612-02 (Reapproved 2009)*, 2009.
- [21] N. A. Bakar, A. Abu-Siada, S. Islam, “A review of dissolved gas analysis measurement and interpretation techniques,” *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, pp3 39-49, 2014.

負荷變化에 따른 3相 變壓器의 3次元 有限要素解析

崔 仁 錫

釜慶大學校 産業大學院 電氣工學科

요 약

변압기는 고정기로서 에너지 변환 장치는 아니지만 많은 에너지 변환 계통에서 필수적이고 공통 자기 회로에 의해 결합된 2개 이상의 전기 회로를 갖는 간단한 장치로써 광범위하게 사용되고 있다. 변압기의 2 차측에 접속되는 대부분의 부하는 일반적으로 일정 전압에서 동작하도록 설계되어 있다. 그러나 변압기에 부하 전류가 흐르게 될 때 변압기의 내부 임피던스로 인한 전압 강하 때문에 부하 단자 전압이 변하게 되고, 이 부하 단자 전압은 부하의 상태에 따라 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다. 이러한 부하 전압 변화는 변압기 내부 임피던스의 전압 강하의, 특성에 영향을 받는다. 부하가 클 때 부하 전압의 변화가 크다면 바람직하지 않으며 전압 강하를 줄이기 위해서는 변압기의 내부 임피던스가 작도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 3상 변압기의 부하 변동에 따른 출력 특성을 해석하였다. 특성 해석의 정확성을 높이기 위하여 3차원 유한요소해석 프로그램을 사용하였고, 부하 변동에 따른 전압, 전류 특성 그리고 불평형 저항 부하에서 발생하는 전류 및 자속밀도 특성을 알아보았다. 해석 결과 부하 저항이 작아질수록 2차 전류가 증가해져 2차 전압의 크기 및 위상에 불균일 특성이 발생함을 알 수 있었다. 또한 전압의 불균일 특성으로 인하여 발생된 자속밀도의 특성도 불균일하게 나타남을 알 수 있었다.