

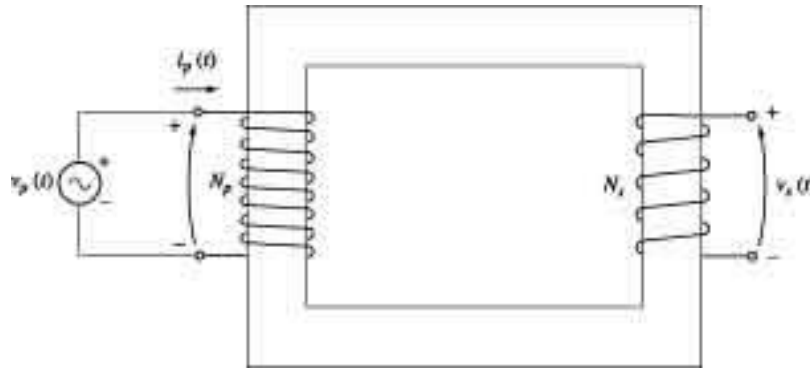
Ch.2 Transformers

- 실제 변압기의 개요
- 변압기 등가회로
- 근사등가회로

KOPEL



〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요

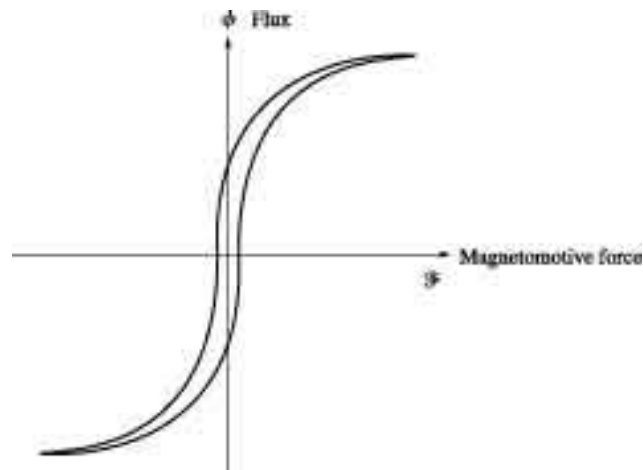


<주안점>

실제 변압기에서는

- 권선에서 열이 발생되고
- 누설자속도 존재하며
- 철심에서 발열되고
- 철심의 투자율이 유한하며

비선형특성을 가짐(히스테리시스 특성)



이상변압기 모델을 기준으로 하여
실제변압기의 등가모델을 구해 보자

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요

① 이상변압기에서는

$$e_{ind} = \frac{d\lambda}{dt}$$

파라데이 법칙 : '변압기작용'의 근본 원리

$$\lambda = \sum_{i=1}^N \phi_i$$

Flux linkage : 모든 권선에 대한 자속의 총합

② 실제변압기에서는

$$\bar{\phi} = \frac{\lambda}{N}$$

평균자속 : 코일의 상대적 위치에 따라 통과하는
자속의 양이 달라지므로 평균값을 취함

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$$

평균자속에 대한 유기기전력

<제2장> 2.4 실제변압기의 개요 – 1차권선의 발생자속

① 1차 권선에서는

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$$

1차권선의 경우 $v_p(t) = e_{ind}(t)$, $v_1(t) = e_1(t)$

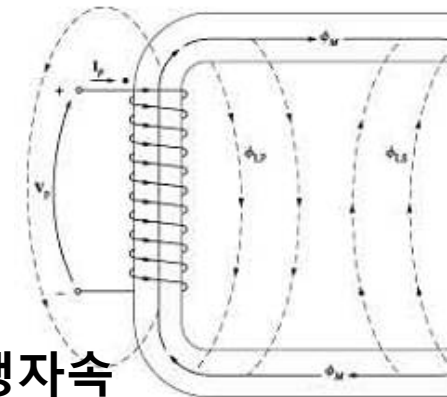
$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_P} \int v_P(t) dt$$

권선의 자속은 권선의 인가전압의 적분에 비례

② 1차권선의 발생자속 ; mutual flux + leakage flux

$$\bar{\phi}_P = \frac{\lambda}{N_P} \rightarrow \bar{\phi}_P = \phi_M + \phi_{LP}$$

$$\bar{\phi}_1 = \phi_{12} + \phi_{l1} ; \text{ 1차 권선의 총 발생자속}$$



ϕ_{12} ; 1차 권선의 발생자속중 2차권선을 쇄교하는 자속

ϕ_{l1} ; 1차 권선의 발생자속중 1차권선을 쇄교하는 자속

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 1차권선의 발생전압

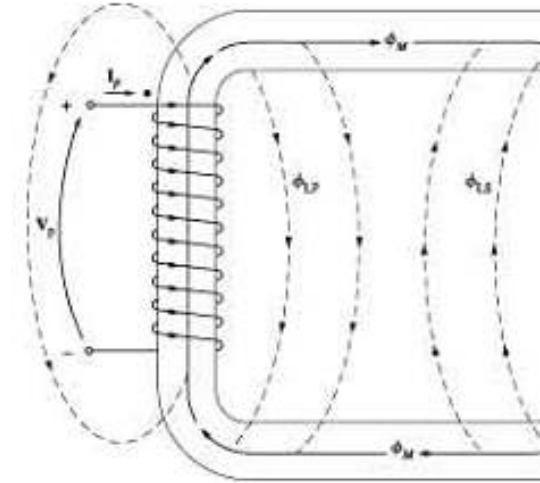
③ 1차권선의 전압방정식

$$v_P(t) = N_P \frac{d\bar{\phi}_P}{dt} = N_P \frac{d\bar{\phi}_M}{dt} + N_P \frac{d\bar{\phi}_{LP}}{dt}$$

$$v_1(t) = N_1 \frac{d\bar{\phi}_1}{dt} = N_1 \frac{d\bar{\phi}_{12}}{dt} + N_1 \frac{d\bar{\phi}_{l1}}{dt}$$

$\downarrow$
 $e_1(t)$

$\downarrow$
 $e_{l1}(t)$



- 1차 권선의 유기기전력 $e_P(t) = N_P \frac{d\bar{\phi}_M}{dt}$, $e_1(t) = N_1 \frac{d\bar{\phi}_{12}}{dt}$
- 1차측 누설자속에 의한 전압강하 $e_{LP}(t) = N_P \frac{d\bar{\phi}_{LP}}{dt}$, $e_{l1}(t) = N_1 \frac{d\bar{\phi}_{l1}}{dt}$
- 1차 권선의 전압방정식

$$v_P(t) = e_P(t) + e_{LP}(t) \quad , \quad v_1(t) = e_1(t) + e_{l1}(t)$$

<제2장> 2.4 실제변압기의 개요 – 2차권선의 발생자속

① 2차 권선의 발생자속 ; mutual flux + leakage flux

$$\overline{\phi_S} = \phi_M + \phi_{LS} \rightarrow \overline{\phi_2} = \phi_{21} + \phi_{l2} \quad \text{2차 권선의 총 발생자속}$$

ϕ_{21} ; 2차 권선의 발생자속중 1차권선을 쇄교하는 자속

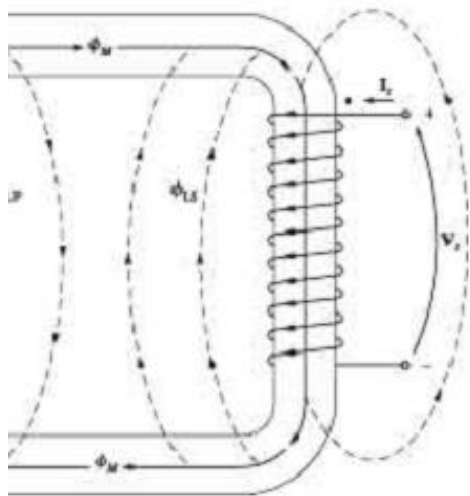
ϕ_{l2} ; 2차 권선의 발생자속중 2차권선을 쇄교하는 자속

<전류의 유입방향에 유의>

② 2차권선의 발생전압

$$\rightarrow v_s(t) = N_s \frac{d\overline{\phi_S}}{dt} = N_s \frac{d\overline{\phi_M}}{dt} + N_s \frac{d\overline{\phi_{LS}}}{dt}$$

$$v_2(t) = N_2 \frac{d\overline{\phi_2}}{dt} = N_2 \frac{d\overline{\phi_{21}}}{dt} + N_2 \frac{d\overline{\phi_{l2}}}{dt}$$



- 2차 유기기전력 $e_s(t) = N_s \frac{d\overline{\phi_M}}{dt}$, $e_2(t) = N_2 \frac{d\overline{\phi_{21}}}{dt}$

- 2차 누설전압강하 $e_{LS}(t) = N_s \frac{d\overline{\phi_{LS}}}{dt}$, $e_{l2}(t) = N_2 \frac{d\overline{\phi_{l2}}}{dt}$

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 2차권선의 발생전압

③ 2차 권선의 전압방정식 <전류의 유입방향에 유의 ; 단자에서 변압기로 유입>

$$v_S(t) = e_S(t) + e_{LS}(t) \quad v_2(t) = e_2(t) + e_{l2}(t)$$

일반적으로 변압기에서는 $\phi_{12} = \phi_{21} = \phi_M$ 의 조건을 만족하므로

- 1차 및 2차 권선의 유기전압의 표현에서

$$e_S(t) = N_S \frac{d\overline{\phi_M}}{dt} \quad \& \quad e_P(t) = N_P \frac{d\overline{\phi_M}}{dt} \quad \rightarrow \quad \frac{e_P(t)}{N_P} = \frac{d\overline{\phi_M}}{dt} = \frac{e_S(t)}{N_S}$$

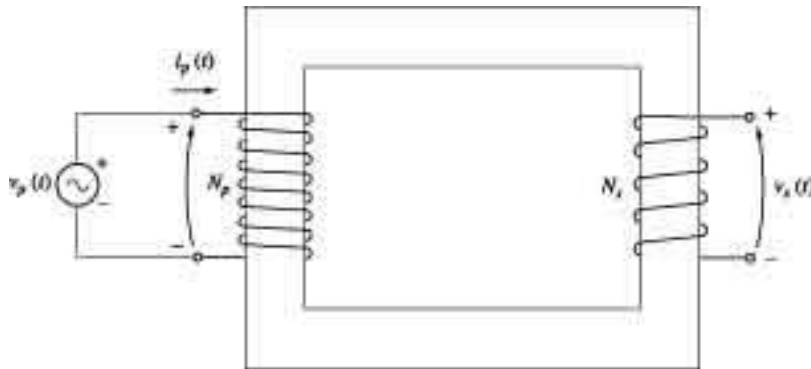
i) 1차 및 2차 유기기전력의 비 $\frac{e_P(t)}{e_S(t)} \equiv \frac{N_P}{N_S} = a$; 권선비

ii) 1차 및 2차 단자전압의 비 $\frac{v_P(t)}{v_S(t)} \approx \frac{N_P}{N_S} = a$

↑
누설리액턴스가 작을 경우

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 자화전류

① 1차 권선에는 교류전원이 연결되어 있고 부하가 없을 경우



- 무부하이지만 1차측에서 전류 유입됨

i) 자화전류 $i_M(t)$ 또는 $i_\phi(t)$

ii) 철손전류 $i_{h+e}(t)$

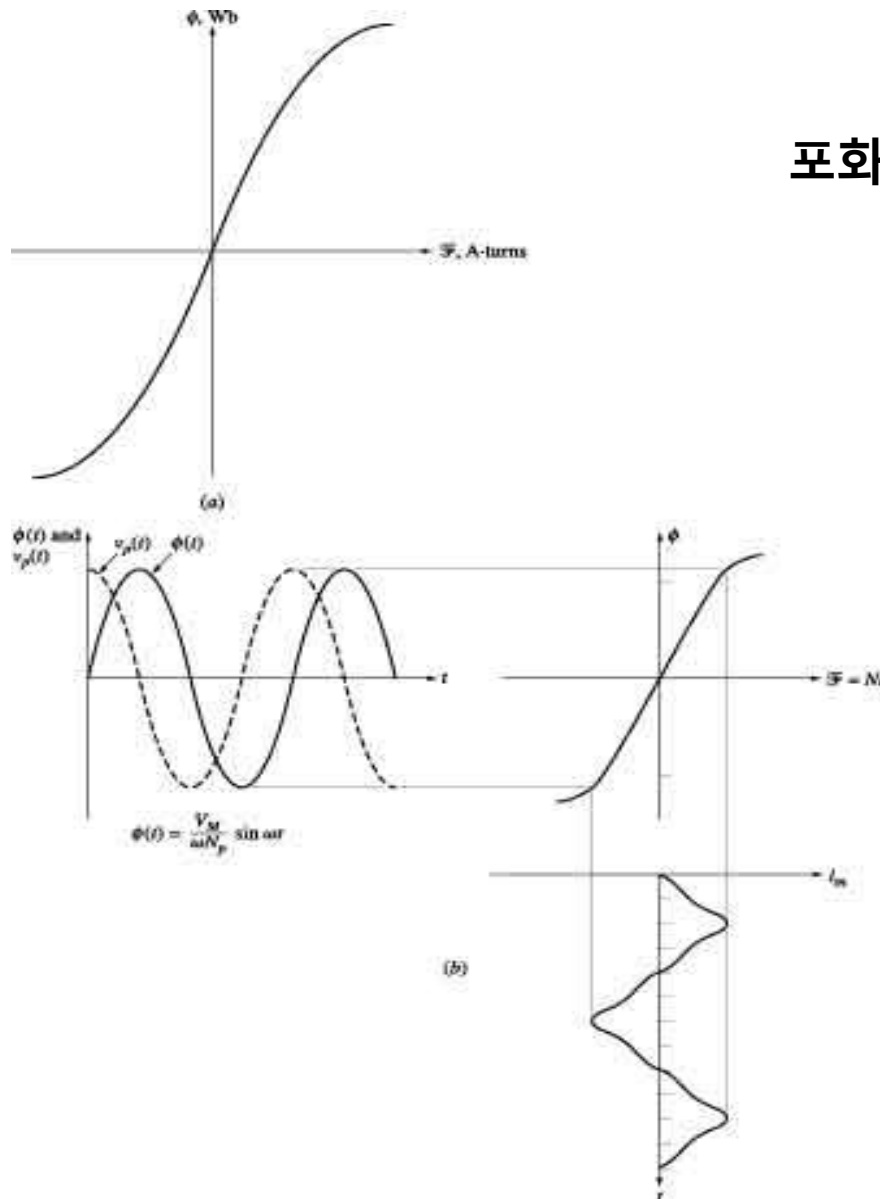
② 1차권선의 인가전압 ; $v_P(t) = V_M \cos \omega t$ 로 주어질 경우

발생자속
$$\bar{\phi} = \frac{1}{N_P} \int v_P(t) dt = \frac{V_M}{\omega N_P} \sin \omega t$$

- 자화전류 $i_M(t)$ 는 자속 $\bar{\phi}$ 을 발생시키기 위한 전류임

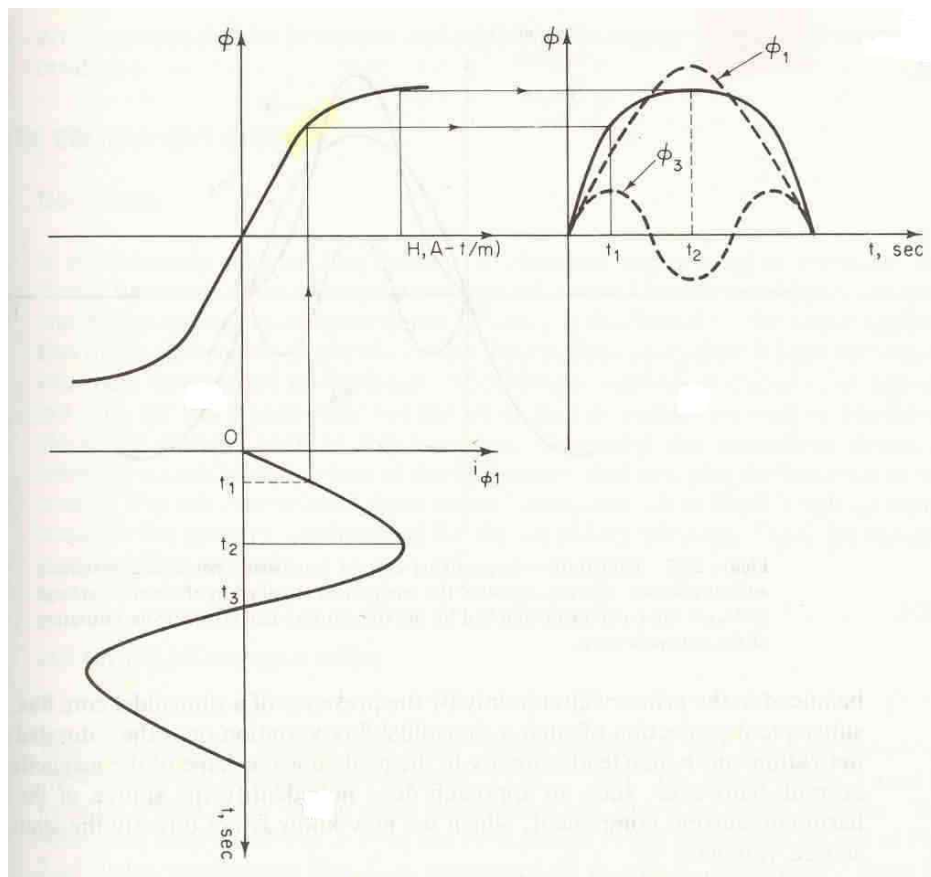
〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 자화곡선

포화모델의 **자화곡선**(magnetization curve)



- 1) 자속과 유기전압은 90도 위상차
- 자속이 유기전압에 비해 지연
- 2) 정현파 자속을 위해 비정현파의 자화전류가 유입되어야 함
- 포화로 인해 피크부분의 전류가 급격히 증가함
- 자화전류에 **제3고조파 전류성분** 함유
- 3) 정현파 자화전류가 유입되면
자속이 비정현파로 변화됨
(다음 페이지 참조)

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 자화전류와 자속의 관계



자화곡선상에서

- 1) 정현파의 자화전류가 유입되면
- 2) 자속은 flat-topped wave로 되어
비정현파의 자속이 나타남

$$e_{ind} = N \frac{d\bar{\phi}}{dt}$$

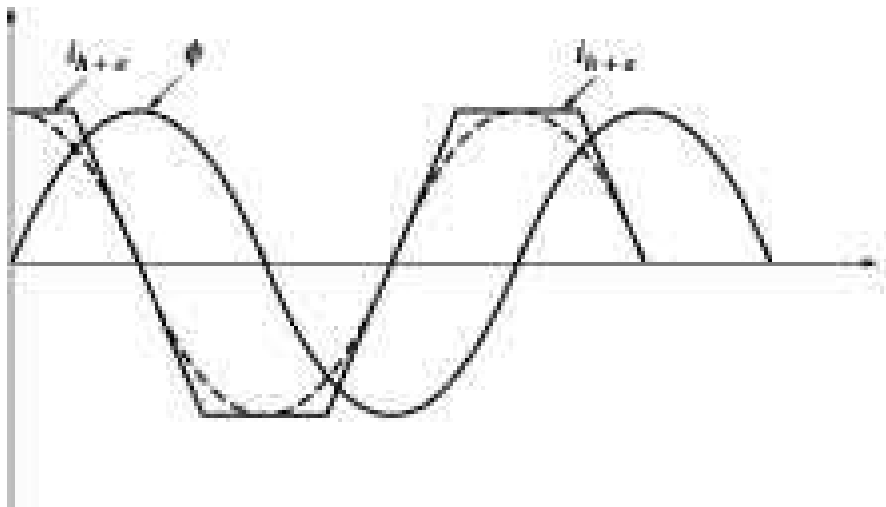
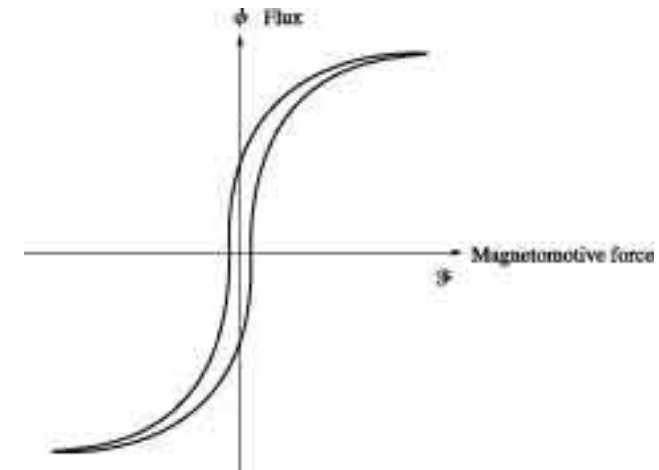
<요점> 정현파 전압의 얻는 방법은 자속을 정현파로 유지하는 것

<제2장> 2.4 실제변압기의 개요 – 철손전류

- 철손전류 = 히스테리시스 전류 + 와전류

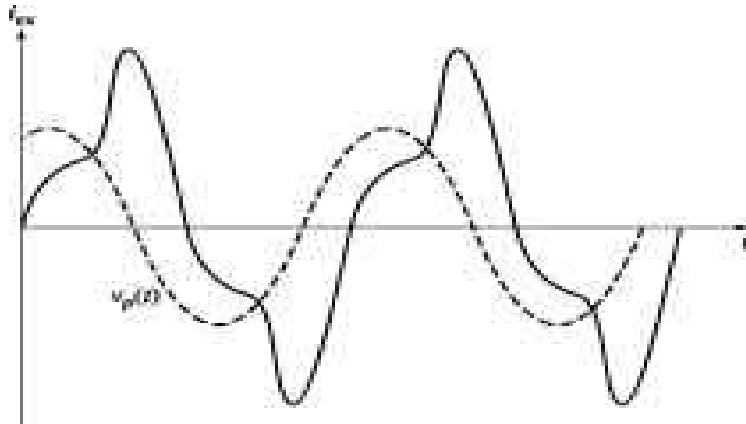
$$\begin{array}{ccccc}
 i_{h+e}(t) & = & i_h(t) & + & i_e(t) \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 P_{h+e} & & P_h & & P_e
 \end{array}$$

- 철손전류는 히스테리시스 성질때문에 비선형 특성을 가짐
- 정현파 전류로 간주하여 해석함

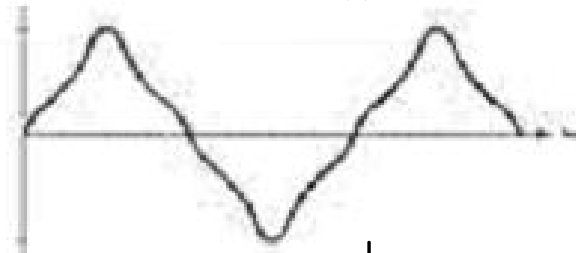


- 철손전류와 유기전압은 동상임 (in-phase)

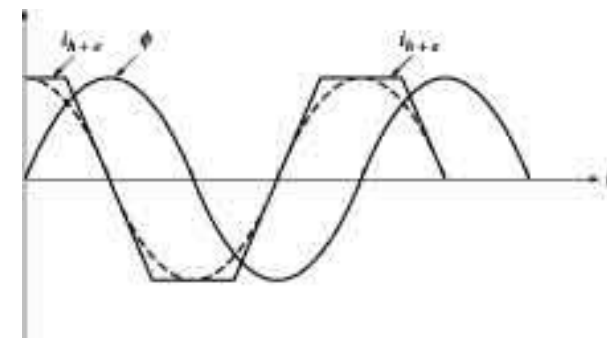
〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 여자전류



||



+



- 여자전류 = 자화전류 + 철손전류

$$i_{ex}(t) = i_M(t) + i_{h+e}(t)$$

- 무부하전류(no-load current) = 여자전류

$$i_o(t) = i_{ex}(t)$$

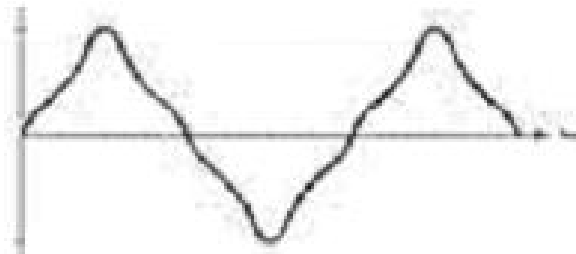
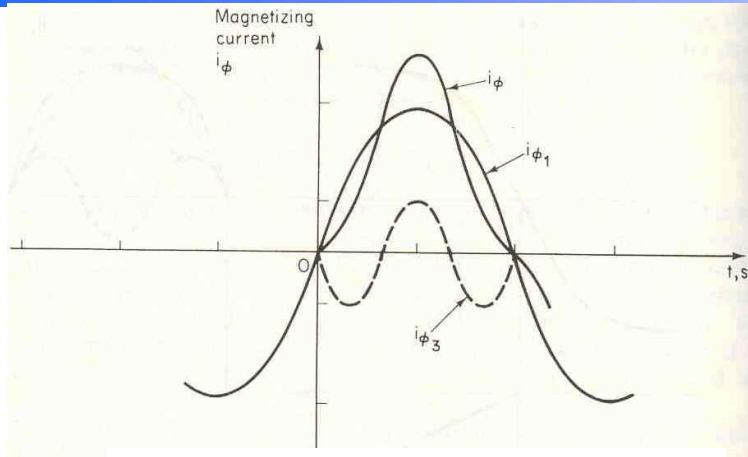
- 자화전류(magnetization current)

$$i_M(t) = i_{M1}(t) + i_{M3}(t)$$

- 철손전류(hysteresis & eddy current)

$$i_{h+e}(t) = i_h(t) + i_e(t)$$

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 여자전류의 분석

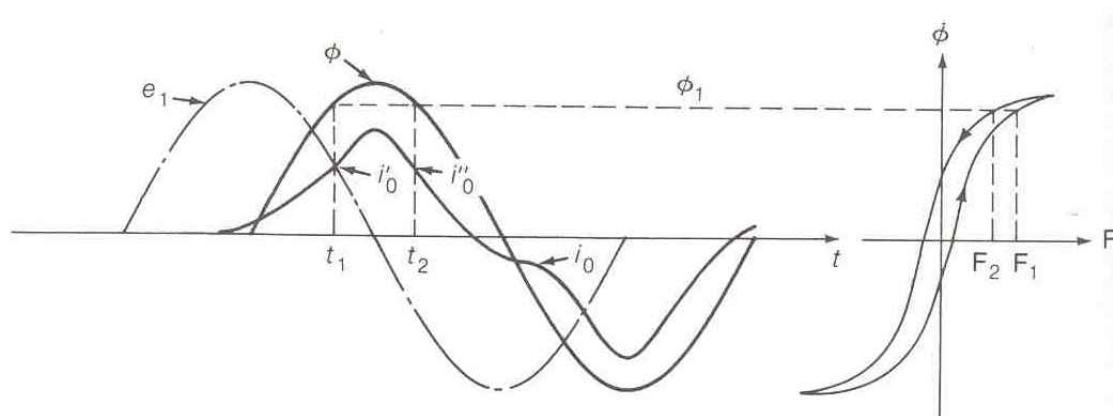


① 자화전류

- 유기전압보다 90도 지연되는 전류성분
- 기본파와 3고조파의 합으로 구성
- 철심의 포화특성으로 인한 비선형 특성

② 철손전류

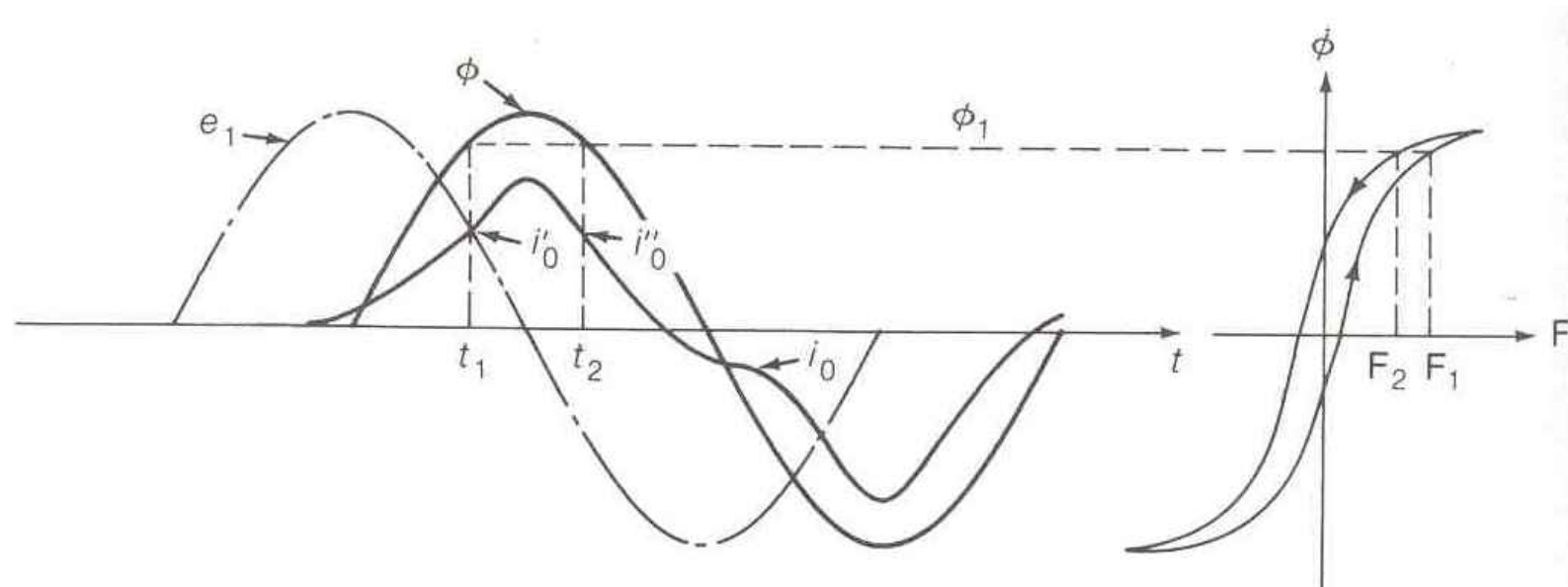
- 유기전압과 동상인 전류성분
- 정현파성분으로 간주함
- 히스테리시스 및 와전류를 나타내는 성분



③ 여자전류

- 자화전류와 철손전류의 합

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 여자전류의 도식적 분석



히스테리시스 곡선상에서 직접 여자전류를 구할 수 있음

- 시간 t_1 , t_2 에서의 자속의 값을 $\phi - \mathcal{F}$ 의 곡선상에서 $\mathcal{F}$ 에 대한 전류를 구해서 점을 찍어 나가면 최종 여자전류의 파형을 얻을 수 있다.

〈제2장〉 2.4 실제변압기의 개요 – 1차 및 2차 전류

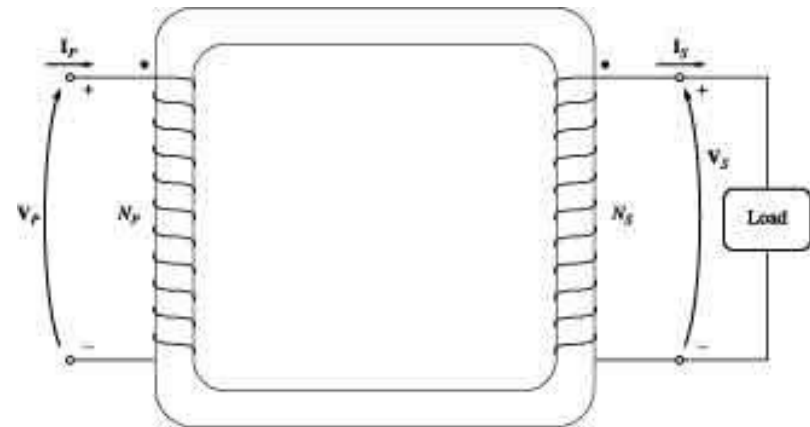
<1차 및 2차 전류의 관계>

지금 2차측의 단자에 부하가 연결되어 전류 $i_s(t)$ 가 흐르고
전원측에는 전류 $i_p(t)$ 가 흐른다고 하자

철심내에는 주자속과 반작용자속이
서로 상쇄하는 작용을 하고

$$\mathfrak{I}_{net} = N_P i_P - N_S i_S$$

$$\mathfrak{I}_{net} = N_P i_P - N_S i_S \equiv \mathfrak{R} \phi$$



일반적으로 변압기의 투자율이 매우 크므로 자기저항을 거의 0으로 간주할 수 있다. 따라서 1차전류와 2차전류의 관계를 구할 수 있다.

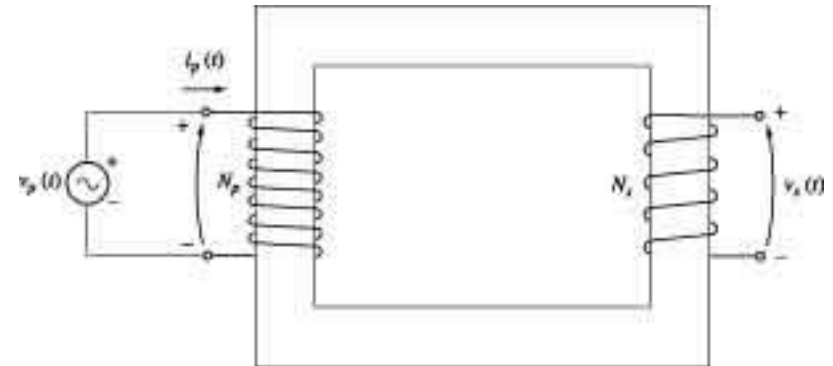
$$N_P i_P(t) \approx N_S i_S(t) \quad \rightarrow \quad \frac{i_P(t)}{i_S(t)} \approx \frac{N_S}{N_P} = \frac{1}{a} \quad , \quad \frac{i_1(t)}{i_2(t)} \approx \frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{a}$$

변압기 등가회로 Transformer EQ Circuit

〈제2장〉 2.4 변압기의 등가회로

(1) 실제 변압기에서 나타나는 현상

- 권선에서 열이 발생되고
- 누설자속으로 권선의 인가전압이 저하되고
- 자속발생을 위한 자화전류가 필요하고
- 철심에서 발열이 나타난다.



(2) 상기 현상의 반영

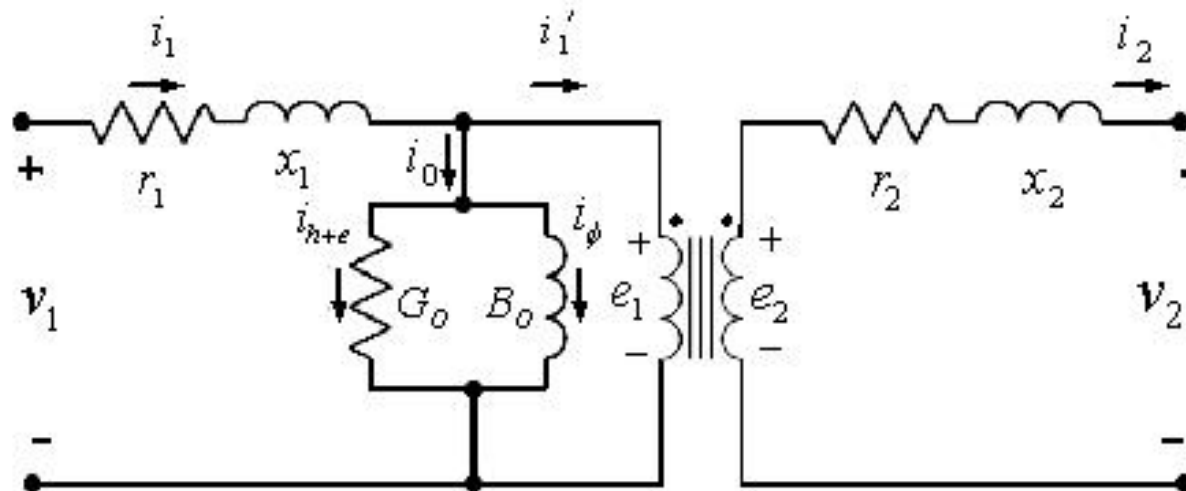
- ① 분포되어 있는 권선저항(winding resistance)을 lumped parameter로 등가변환
- ② 누설자속에 의해 나타나는 실질적인 전압강하를 고려
- ③ 철심내 항상 자속이 발생되도록 자화전류를 공급하는 경로를 추가
- ④ 철손을 정의하고 필요한 철손 전류가 흐를 수 있도록 회로에 반영

→ 이상변압기 모델을 기준으로 하여 이러한 현상을 회로에 반영함으로써
실제변압기의 전기적 등가회로, 나아가서 변압기 등가회로 를 도출해 보자

〈제2장〉 2.4 변압기의 등가회로 – 실제변압기에서 나타나는 현상

(1) 실제 변압기에서 나타나는 현상 (종합)

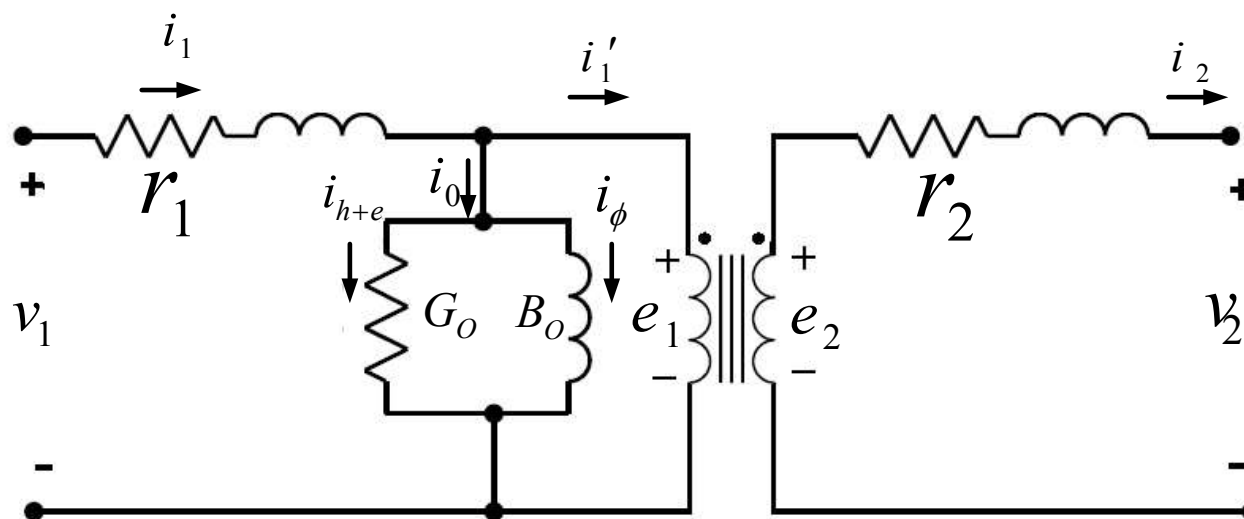
- | | | |
|----------------------------|---|----------------------------|
| - 권선의 발열 ; 1차 및 2차 권선저항 | ← | R_P R_S 또는 r_1 r_2 |
| - 누설자속 발생 ; 1차 및 2차 누설리액턴스 | ← | X_P X_S 또는 x_1 x_2 |
| - 자화전류 경로 ; 자화 리액턴스 | ← | X_M 또는 B_O |
| - 철손발생 ; 철손저항 | ← | R_C 또는 G_O |



<제2장> 2.4 변압기의 등가회로 - 1차 및 2차 권선 저항

(1) 1차 및 2차 권선 저항

- 권선의 발열 → 1차 및 2차 권선저항으로 반영 ; $R = \rho \frac{l}{A}$
- 1차권선의 턴수 N_1 에 해당하는 분포저항 ← R_p 또는 r_1
- 2차권선의 턴수 N_2 에 해당하는 분포저항 ← R_s 또는 r_2



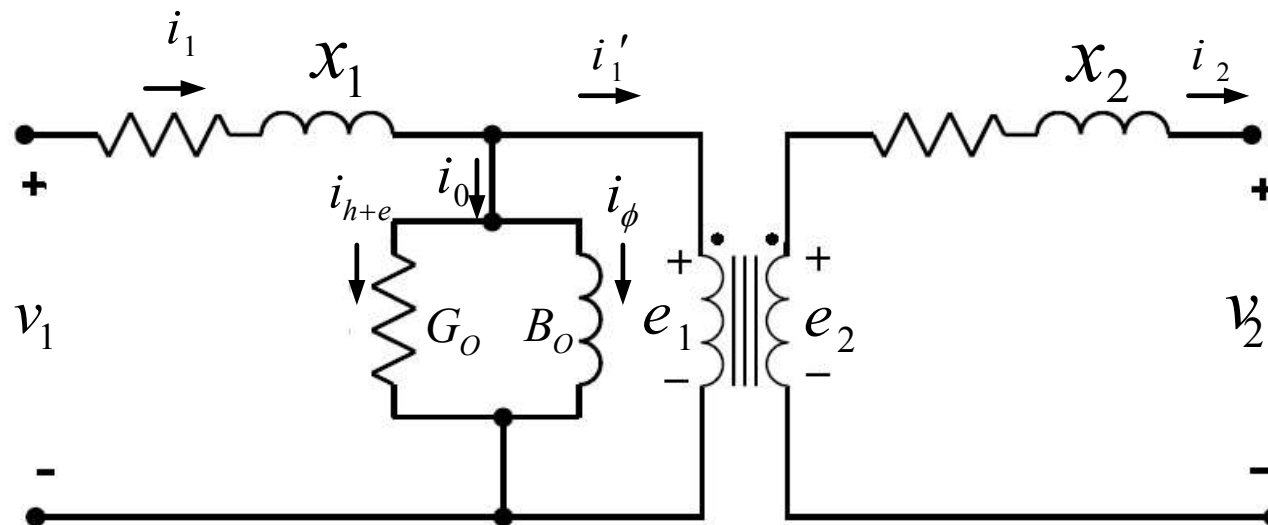
〈제2장〉 2.4 변압기의 등가회로 - 1차 및 2차 누설리액턴스

(2) 1차 및 2차 누설리액턴스

- 누설자속 발생 → 1차 및 2차 누설리액턴스 ; 수식표현은 다음 페이지 참조

- 1차측 누설자속 φ_{LP} 에 해당하는 누설리액턴스 ← X_P 또는 x_1

- 2차측 누설자속 φ_{LS} 에 해당하는 누설리액턴스 ← X_S 또는 x_2



〈제2장〉 2.4 변압기의 등가회로 – 1차 및 2차 누설리액턴스 강하

(3) 1차 및 2차 누설리액턴스의 전압강하

① 1차측 누설자속 ϕ_{LP} 에 해당하는 전압강하

$$\begin{aligned} e_{LP}(t) &= N_P \frac{d\overline{\phi_{LP}}}{dt} & \leftarrow & \phi_{LP} = \frac{N_P}{\Re} i_P(t) \\ &= \frac{N_P^2}{\Re} \frac{di_P(t)}{dt} & \leftarrow & L_P = \frac{N_P^2}{\Re} \end{aligned}$$

$$\therefore e_{LP}(t) = L_P \frac{di_P(t)}{dt} = \omega L_P \frac{di_P(t)}{d\omega t} = X_P \frac{di_P(t)}{d\omega t} \quad \leftarrow \quad X_P (x_1)$$

② 2차측 누설자속 ϕ_{LS} 에 해당하는 전압강하 $e_{LS}(t) = N_S \frac{d\overline{\phi_{LS}}}{dt}$

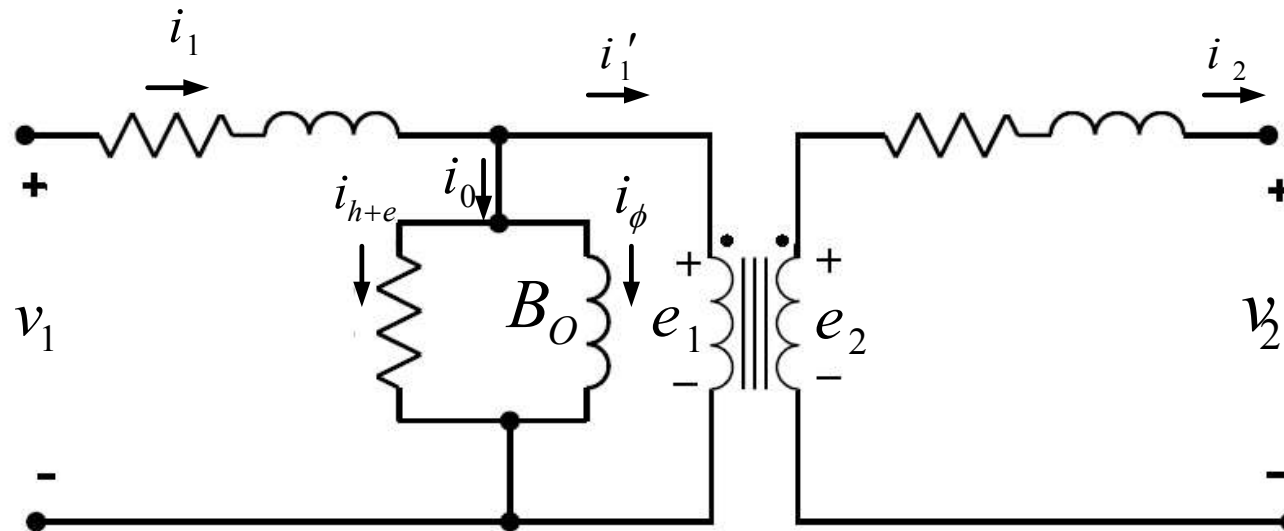
$$e_{LS}(t) = L_S \frac{di_S(t)}{dt} = X_S \frac{di_S(t)}{d\omega t} \quad \leftarrow \quad X_S (x_2)$$

〈제2장〉 2.4 변압기의 등가회로 - 자화 서셉턴스

(4) 여자 서셉턴스

- 자속발생을 위한 전류 경로 → 여자 리액턴스 ← X_M
- 여자 서셉턴스(exciting susceptance) ← B_O

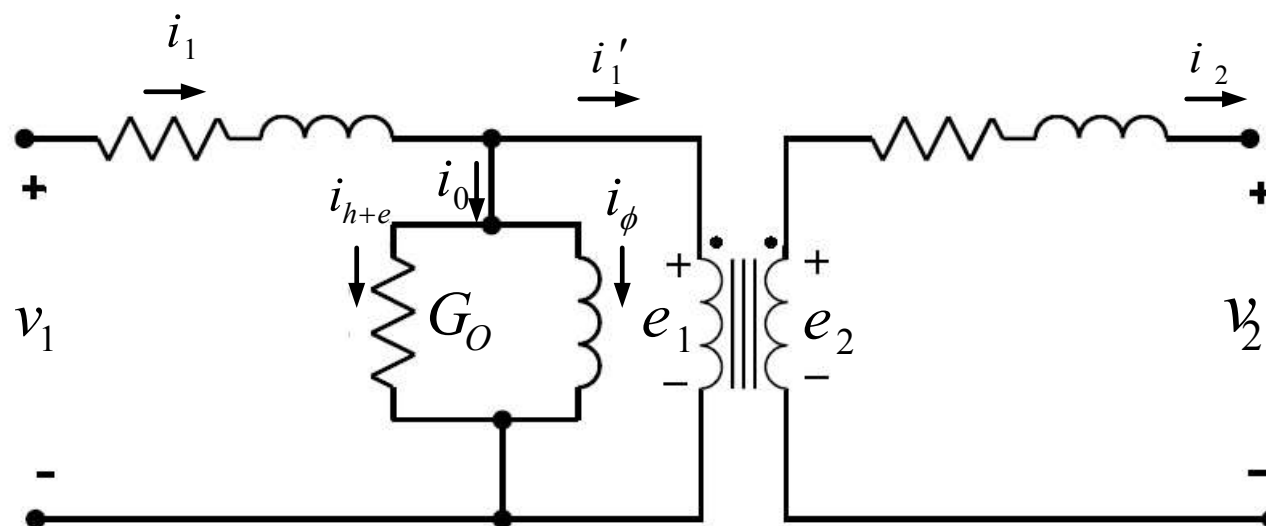
- 전류 $i_2 = 0$ 이 되면 $i_1' = 0$ 으로 되더라도 철심내 자속이 여전히 존재할 수 있는 가상적인 자속발생용 리액턴스 ; B_O



〈제2장〉 2.4 변압기의 등가회로 - 여자 컨덕턴스

(5) 여자 컨덕턴스

- 철손공급을 위한 전류 경로 → 여자 저항 ← R_C
- 여자 컨덕턴스(exciting conductance) ← G_O



<제2장> 2.4 변압기의 등가회로 - 여자회로

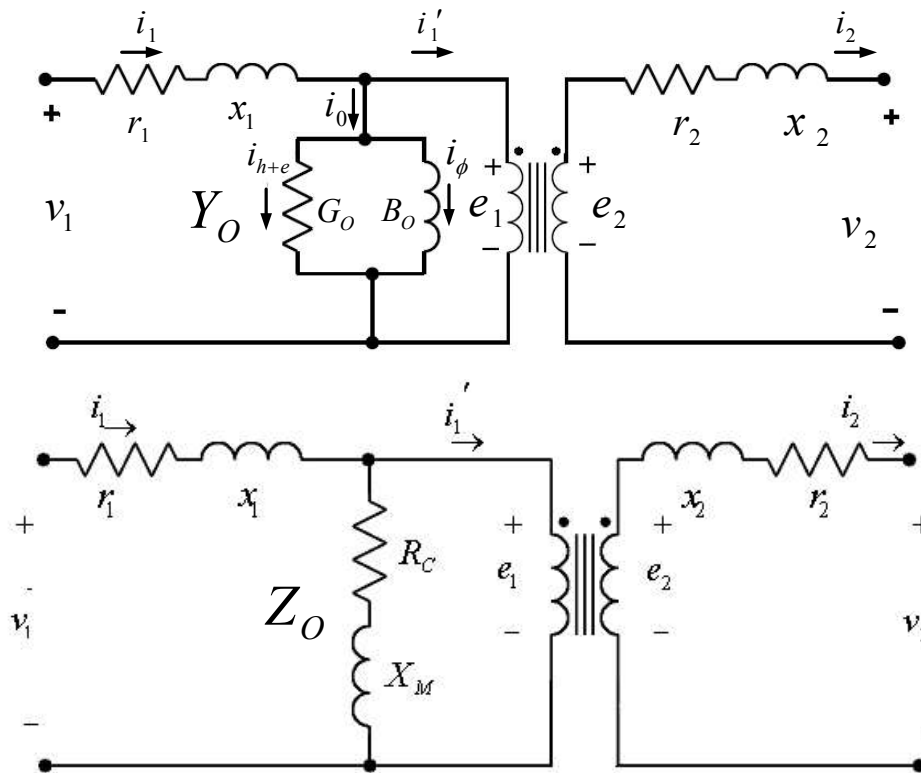
(6) 여자회로 (exciting circuit)

① 병렬회로 $\rightarrow Y_O = G_O - jB_O$

② 직렬회로 $\rightarrow Z_O = R_C + jX_M$

여자어드미턴스 Y_O 와 여자임피던스 Z_O 는 서로 역수의 관계에 있으므로

$$\begin{aligned} G_O - jB_O &= \frac{1}{R_C + jX_M} \\ &= \frac{1}{R_C + jX_M} \cdot \frac{R_C - jX_M}{R_C - jX_M} \\ &= \frac{R_C}{R_C^2 + X_M^2} - j \frac{X_M}{R_C^2 + X_M^2} \end{aligned}$$



여자컨덕턴스

$$G_O = \frac{R_C}{R_C^2 + X_M^2}$$

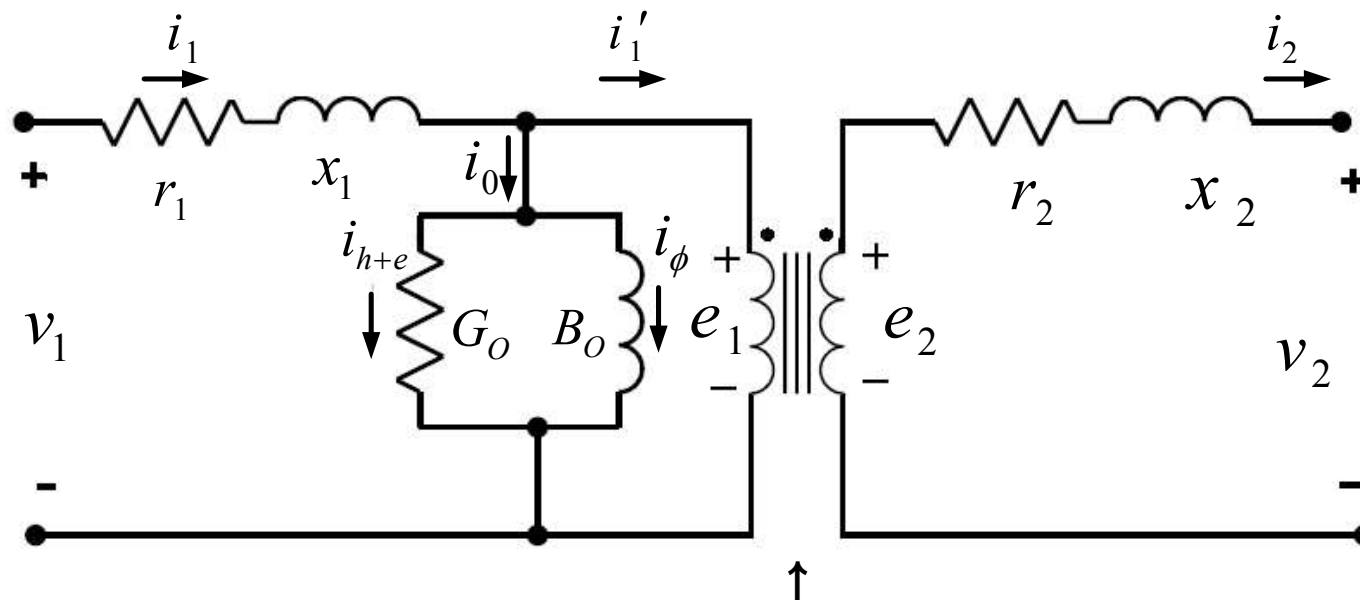
여자서셉턴스

$$B_O = \frac{X_M}{R_C^2 + X_M^2}$$

<제2장> 2.4 변압기의 등가회로 – 변압기의 전기적 등가회로

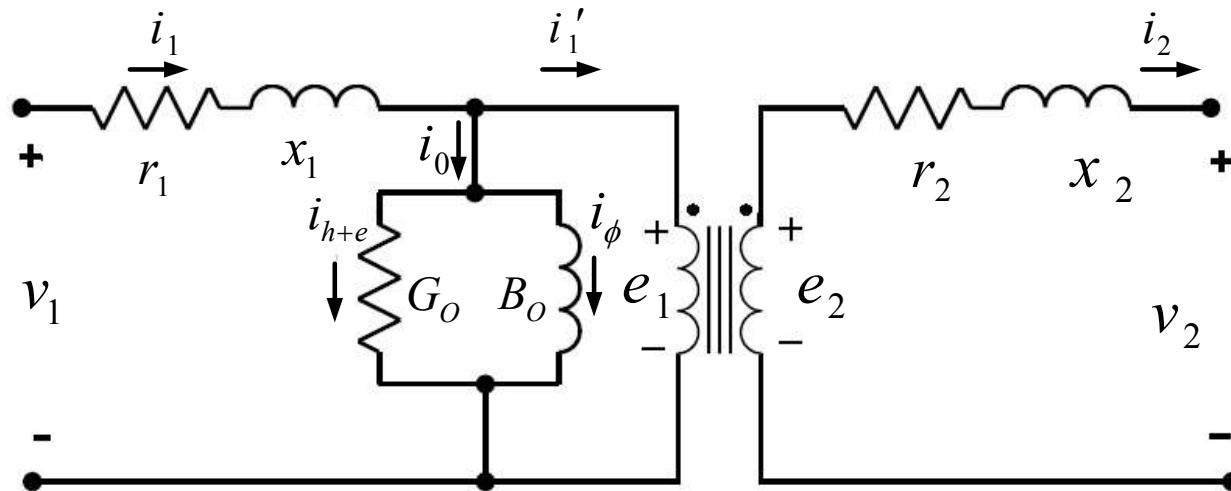
(7) 실제 변압기에서 나타나는 현상 → 전기적 등가회로

- ① 권선의 발열 → 1차 및 2차 권선저항
- ② 누설자속 발생 → 1차 및 2차 누설리액턴스
- ③ 자화전류 경로 → 여자 서셉턴스
- ④ 철손 발생 → 여자 콘덕턴스



<이상변압기> $N_1 : N_2$

① $i_1' \rightarrow$ 1차 부하전류 ② $i_2 \rightarrow$ 2차 전류 ; $\frac{i_1'}{i_2} = \frac{1}{a}$
 ③ $i_1 \rightarrow$ 1차 전류 (부하전류)
 ④ $i_o = i_{h+e} + i_\phi \rightarrow$ 여자전류(무부하전류)



**<주의> 1차 유기기전력 $e_1(t)$ 는 히스테리시스전류 $i_{h+e}(t)$ 와는 동상이고
자화전류 $i_\phi(t)$ 와는 90도의 위상차가 난다**

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 - 실제변압기의 등가회로

- 변압기의 등가회로 : C. P. Steinmetz 가 제안

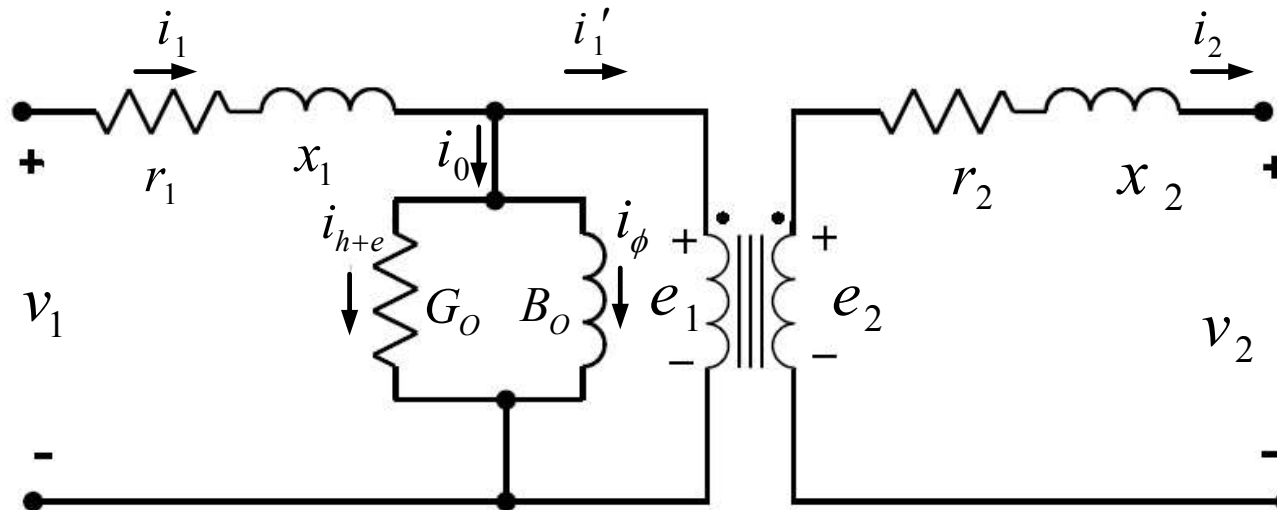
등가회로는 1차 또는 2차에서의 **전력이 동일한 조건**으로 유도됨

① 기본 개념 - 변압기를 없애려면 권선수의 비가 1:1인 변압기를 만들면 됨

② 1:1 변압기는 2차권선을 풀어서 다시 1차권선의 턴수와 동일하게 감으면 됨

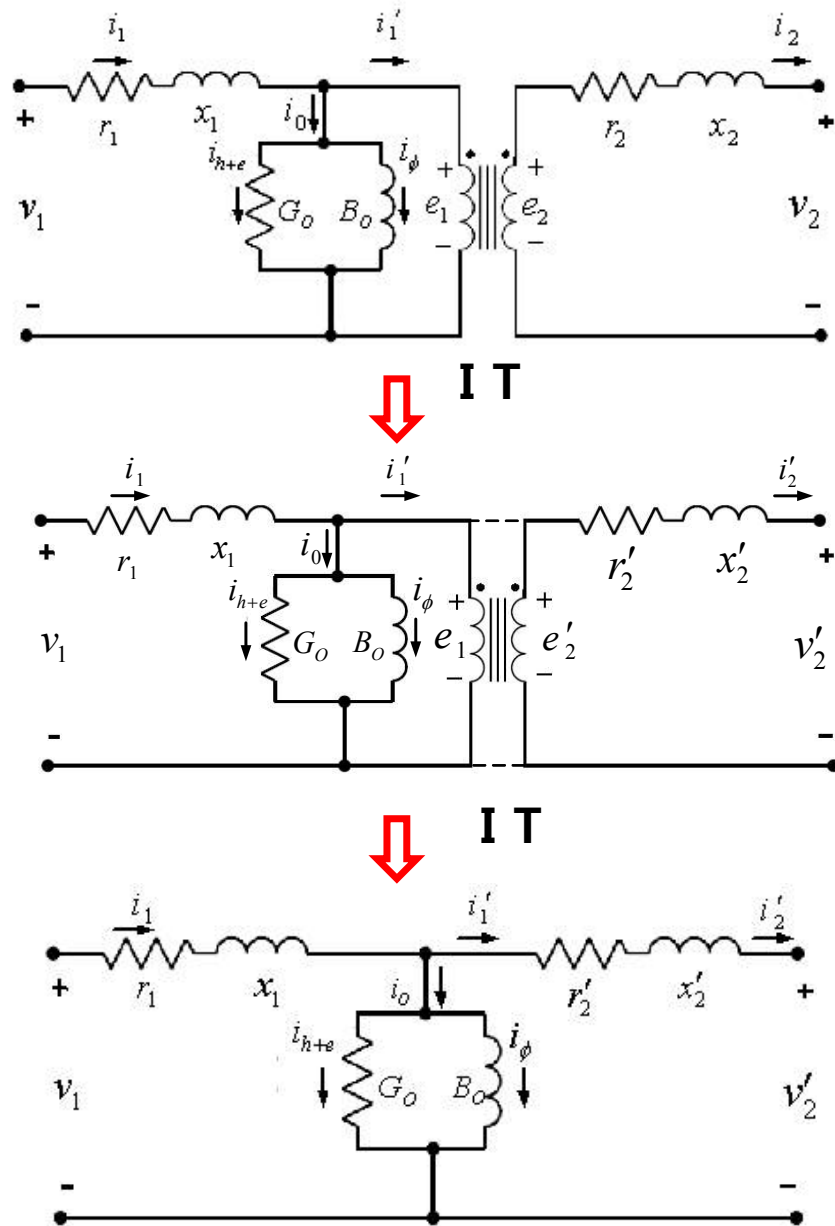
→ 다시 조정할 경우 2차권선의 굵기와 길이가 달라질 것이며

이를 "**2차측을 1차측으로 환산한다.**"고 함



"1 : 1"의 의미 → $e_1 = e_2$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 - 등가변환절차



① N_1/N_2 의 변압기에서

- 권선비 a 를 구하여 2차전압 $e_2(t)$ 를 $e_2'(t) = ae_2(t) = e_1(t)$ 가 되도록 변환함

② 권선비가 1:1로 되었으므로

- 이상변압기 IT 의 양단을 연결해도 같은 전위이므로 문제가 없음
- 2차측 값이 모두 변환(' 표시)되어 있음

③ 변압기가 없어진 간단한 형태

- $e_1 = e_2'$: 여자어드미턴스 양단전압
- 이를 **변압기의 등가회로**라고 함
(equivalent circuit of transformer)

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 – 권선의 환산계수

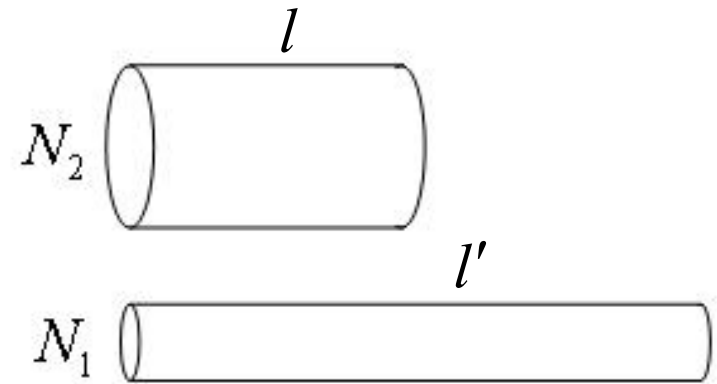
(1) 권선의 환산계수

변압기의 2차측 권선수 N_2 가 1차측 권선수 N_1 와 같도록 2차권선을 재권선하여

환산한 후의 2차측 권선수가 N'_2 이면

$$\therefore N'_2 = N_1 = N_1 \times \frac{N_2}{N_2} = aN_2$$

따라서 권선계수의 환산계수는 a 로 됨



1) 환산전 길이를 l 이라 하면 $l \leftrightarrow N_2$; 2차 권선수

2) 환산후 길이를 l' 이라 하면 $l' \leftrightarrow N'_2 = N_1$; 1차 권선수

이로부터 $\frac{l'}{l} = \frac{N'_2}{N_2} = \frac{N_1}{N_2} = a$ 를 만족하고 따라서 $l' = a \cdot l$ 의 관계를 얻음

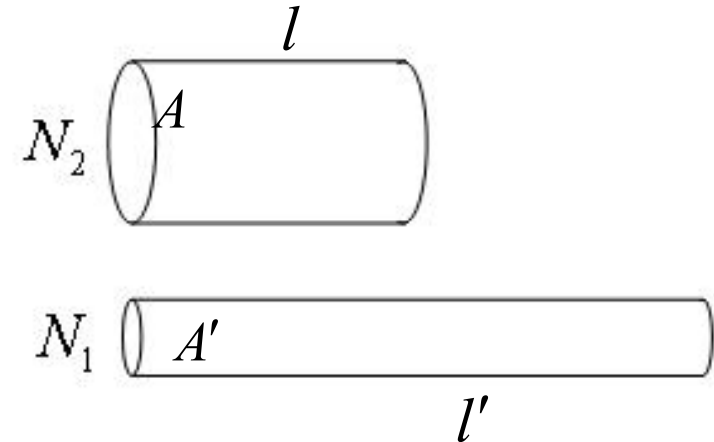
〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 저항의 환산계수

(2) 저항의 환산계수

$l' = a \cdot l$ 의 관계를 이용하고

1) 환산전 단면적을 A 이라 하고

2) 환산후 단면적을 A' 이라 하면



지금 2차권선의 구리의 총 부피는 같으므로

$$A \cdot l = A' \cdot l' \quad \therefore A' = \frac{A}{a} \text{의 관계를 얻을 수 있다}$$

$$1) \text{ 환산전 2차 저항 } r_2 = \rho \frac{l}{A} \quad \rightarrow \quad 2) \text{ 환산후 2차 저항 } r'_2 = \rho \frac{l'}{A'}$$

$$r'_2 = \rho \frac{l'}{A'} = \rho \frac{a \cdot l}{A/a} \quad \therefore r'_2 = a^2 r_2 \quad \rightarrow \quad \text{저항의 환산계수} = a^2$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 리액턴스의 환산계수

(3) 리액턴스의 환산계수

$L_2 = \frac{N_2^2}{\mathfrak{R}}$ 의 관계에서 생각해 보자

1) 환산전 인덕턴스를 L_2 이라 하고

2) 환산후 인덕턴스를 L'_2 이라 하면 $L'_2 = \frac{N_2'^2}{\mathfrak{R}}$

L'_2 의 관계식에 $N_2' = N_1 = aN_2$ 를 대입하여 정리하면

$$\therefore L'_2 = \frac{N_2'^2}{\mathfrak{R}} = \frac{(aN_2)^2}{\mathfrak{R}} = a^2 L_2$$

1) 환산전 2차 리액턴스 $x_2 = \omega L_2 \rightarrow$ 2) 환산후 2차 리액턴스 $x'_2 = \omega L'_2$

$$\therefore x'_2 = \omega L'_2 = a^2 x_2 \quad \rightarrow \quad \text{리액턴스의 환산계수} = a^2$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 임피던스의 환산계수

(4) 임피던스의 환산계수

1) 환산전 임피던스를 Z_2 이라 하고

2) 환산후 임피던스를 Z'_2 이라 하면

$Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$ 의 표현으로부터

$$Z'_2 = \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2} \quad \leftarrow \quad r_2' = a^2 r_2 \quad \& \quad x_2' = a^2 x_2$$

$$\therefore Z'_2 = a^2 Z_2$$

1) 환산전 2차 임피던스 Z_2 $\rightarrow$ 2) 환산후 2차 임피던스 Z'_2

$$\therefore Z'_2 = a^2 Z_2 \quad \rightarrow \quad \text{임피던스의 환산계수} = a^2$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 전압의 환산계수

(5) 전압의 환산계수

1) 환산전 2차 전압을 E_2 이라 하고

2) 환산후 2차 전압을 E'_2 이라 하면

앞의 이상변압기 내용에서 1차 기전력 $E_1 = 4.44 f N_1 \Phi_m$ 로 얻어졌으므로

2차 기전력 $E_2 = 4.44 f N_2 \Phi_m$ 로 표현되어 진다.

$$E'_2 = 4.44 f N'_2 \Phi_m \quad \leftarrow \quad N'_2 = a N_2$$

$$\therefore E'_2 = a E_2$$

1) 환산전 2차 전압 E_2 $\rightarrow$ 2) 환산후 2차 전압 E'_2

$$\therefore E'_2 = a E_2 \quad \rightarrow \quad \text{전압의 환산계수} = a$$

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 – 전류의 환산계수

(6) 전류의 환산계수

지금 2차측 단자에 부하 $R + jX$ 가 연결되어 있다고 하면

1) 환산전 2차 전류를 I_2 이라 하면

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2 + R)^2 + (x_2 + X)^2}}$$

2) 환산후 2차 전류를 I_2' 이라 하면

$$I_2' = \frac{E_2'}{\sqrt{(r_2' + R')^2 + (x_2' + X')^2}} \leftarrow r_2' = a^2 r_2, \quad x_2' = a^2 x_2, \quad E_2' = aE_2$$

$$= \frac{aE_2}{\sqrt{(a^2 r_2 + a^2 R)^2 + (a^2 x_2 + a^2 X)^2}} = \frac{I_2}{a}$$

1) 환산전 2차 전류 I_2 $\rightarrow$ 2) 환산후 2차 전류 I_2'

$$\therefore I_2' = \frac{I_2}{a} \quad \rightarrow \quad \text{전류의 환산계수} = \frac{1}{a}$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 전력의 환산계수

(7) 2차 동손의 환산계수

1) 환산전 2차 동손을 P_{C2} 이라 하면 $P_{C2} = I_2^2 r_2$

2) 환산후 2차 동손을 P'_{C2} 이라 하면 $P'_{C2} = I_2'^2 r_2' \leftarrow r_2' = a^2 r_2, I_2' = \frac{I_2}{a}$

$\therefore P'_{C2} = I_2'^2 r_2' = I_2^2 r_2 \leftarrow$ 2차 동손은 환산전이나 환산후에 변동없음
(구리의 양이 일정하므로 변동없음)

(8) 2차 출력의 환산계수

1) 환산전 2차 출력을 P_2 이라 하면 $P_2 = I_2^2 R$

2) 환산후 2차 출력을 P'_2 이라 하면 $P'_2 = I_2'^2 R' \leftarrow R' = a^2 R, I_2' = \frac{I_2}{a}$

$\therefore P'_2 = I_2'^2 R' = I_2^2 R \leftarrow$ 2차 출력은 환산전이나 환산후에 변동없음

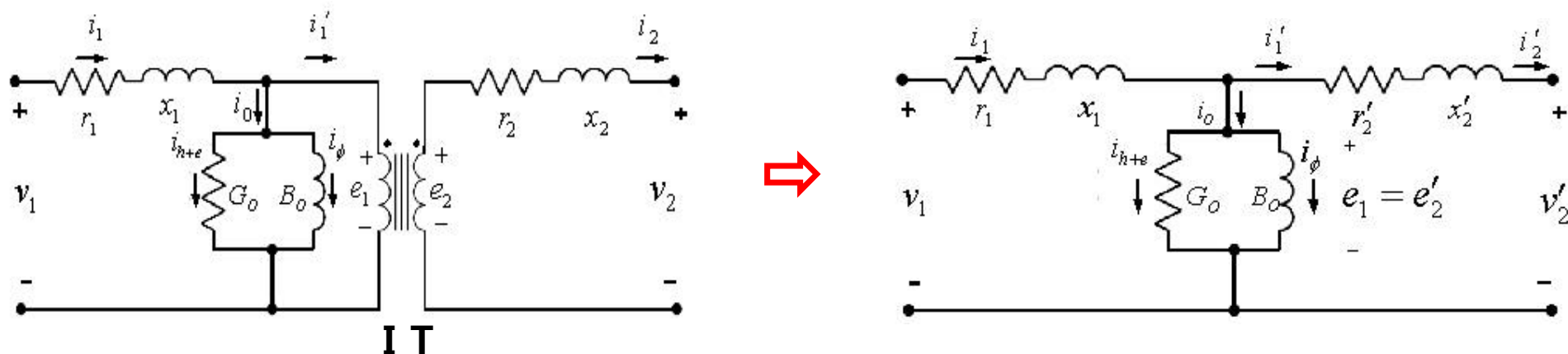
<주의> 등가회로는 '전력의 등가'라는 전제에서 제안되었음이 입증됨

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 환산계수 정리

<주의> 2차의 값을 1차로 환산한 경우를 나타냄

환산대상	환산전	환산후	환산계수
2차 권선수	N_2	$N'_2 = aN_2$	a
2차 저항	r_2	$r'_2 = a^2 r_2$	a^2
2차 리액턴스	x_2	$x'_2 = a^2 x_2$	a^2
2차 임피던스	Z_2	$Z'_2 = a^2 Z_2$	a^2
2차 전압	V_2	$V'_2 = aV_2$	a
2차 전류	I_2	$I'_2 = \frac{I_2}{a}$	$\frac{1}{a}$
2차 동손	P_{C2}	$P'_{C2} = P_{C2}$	1
2차 출력	P_2	$P'_2 = P_2$	1

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 2차를 1차로 변환



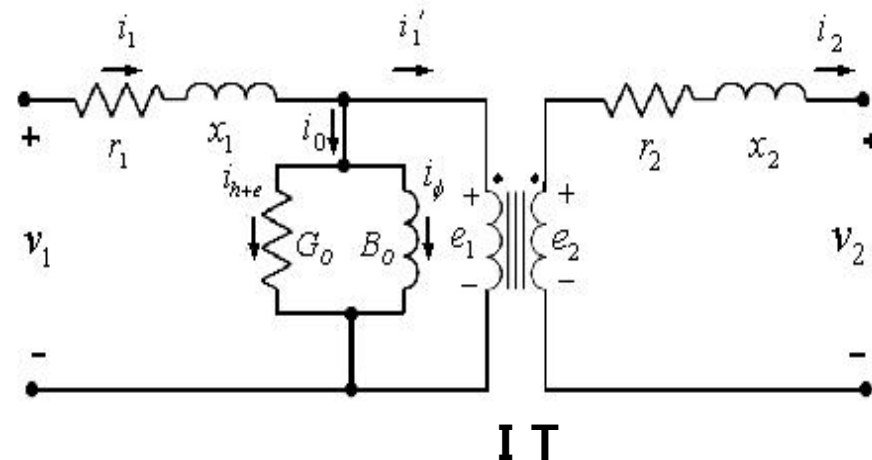
① 환산계수를 이용하여 2차측의 모든 값들을 1차측으로 환산하면 됨

- 2차 권선저항 $r_2' = a^2 r_2$
- 2차 누설리액턴스 $x_2' = a^2 x_2$
- 2차 전류(부하전류) $i_2' = \frac{i_2}{a}$
- 2차측 단자전압 (부하전압) $v_2' = a v_2$

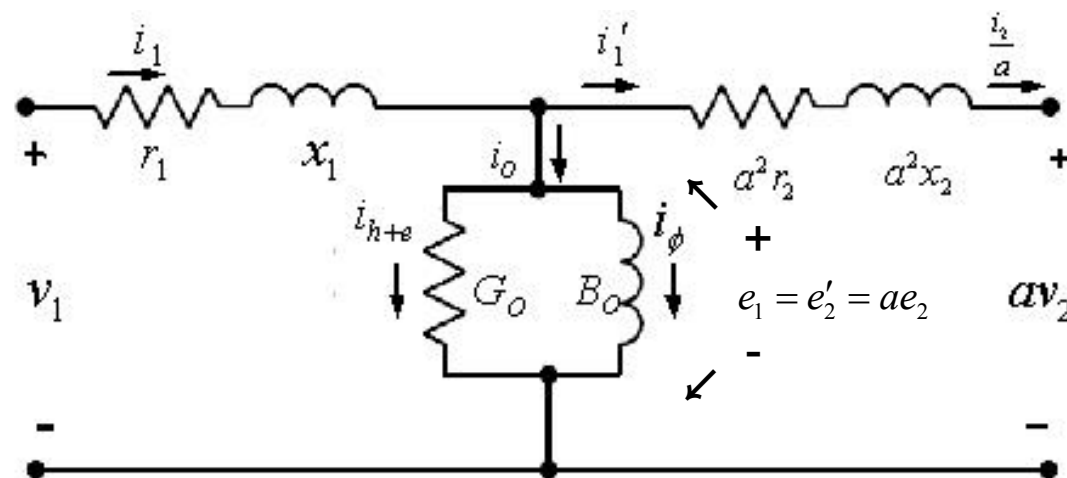
② 권선비가 1:1 로 되었으므로 1차 및 2차 기전력이 동일함 $\rightarrow e_1 = e_2' = a e_2$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 - 2차를 1차로 환산한 회로

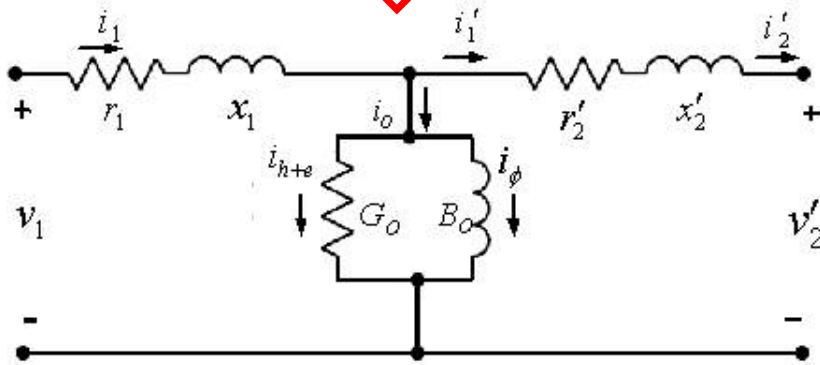
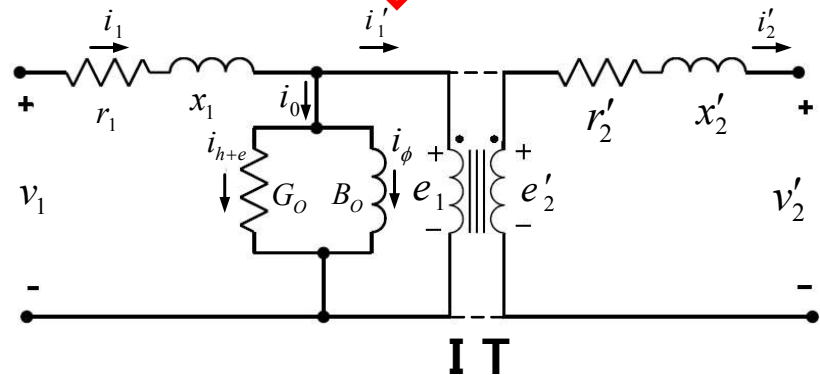
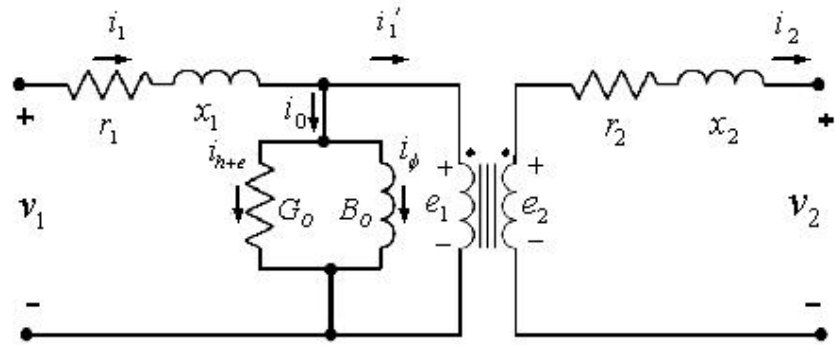
<환산전>



<환산후>



〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 1차를 2차로 변환



① N_1/N_2 의 변압기에서

- 권선비 a 를 구하여 1차전압 $e'_1(t)$ 를 $e'_1(t) = e_1(t)/a = e_2(t)$ 가 되도록 변환함

② 권선비가 1:1로 되었으므로

- 이상변압기 $I T$ 의 양단을 연결해도 같은 전위이므로 문제가 없음
- 1차측 값이 모두 변환(' 표시)되어 있음

③ 변압기가 없어진 간단한 형태

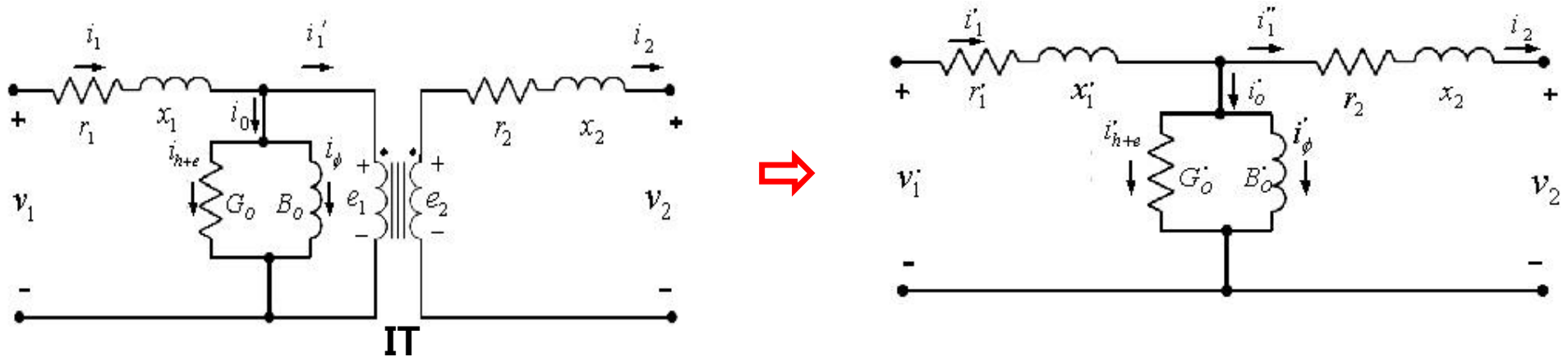
→ 1차를 2차로 환산한 등가회로 임

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 환산계수 정리

<주의> 1차의 값을 2차로 환산한 경우를 나타냄

환산대상	환산전	환산후	환산계수
1차 권선수	N_1	$N'_1 = N_1/a$	$1/a$
1차 저항	r_1	$r'_1 = r_1/a^2$	$1/a^2$
1차 리액턴스	x_1	$x'_1 = x_1/a^2$	$1/a^2$
1차 어드미턴스	Y_O	$Y'_O = a^2 Y_O$	a^2
1차 전압	V_1	$V'_1 = V_1/a$	$1/a$
1차 전류	I_1	$I'_1 = a I_1$	a
1차 동손	P_{C1}	$P'_{C1} = P_{C1}$	1
1차 입력	P_1	$P'_1 = P_1$	1

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 - 1차를 2차로 변환



① 환산계수를 이용하여 1차측의 모든 값들을 2차측으로 환산하면 됨

- 1차측 단자전압 (전원전압) $v_1' = \frac{v_1}{a}$

- 1차 전류(전원전류) $i_1' = ai_1$

- 1차 부하전류 (2차전류) $i_1'' = ai_1' = i_2$

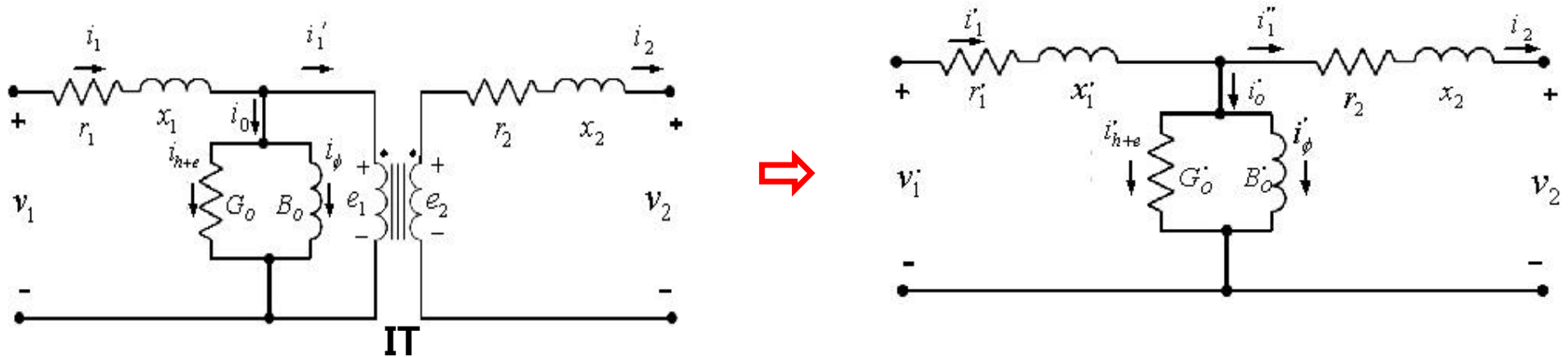
- 1차 권선저항 $r_1' = \frac{r_1}{a^2}$

- 1차 누설리액턴스 $x_1' = \frac{x_1}{a^2}$

<주의> $i_1'' \equiv (i_1')'$; 1차부하전류 i_1' 를 2차로 변환한 값

② 변환후 1:1 권선비로 되므로 1차 및 2차 기전력이 동일함 $\rightarrow e_1' = e_2 = \frac{e_1}{a}$

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 - 1차를 2차로 변환



③ 여자회로에 있는 G'_o 와 B'_o 이 달라짐

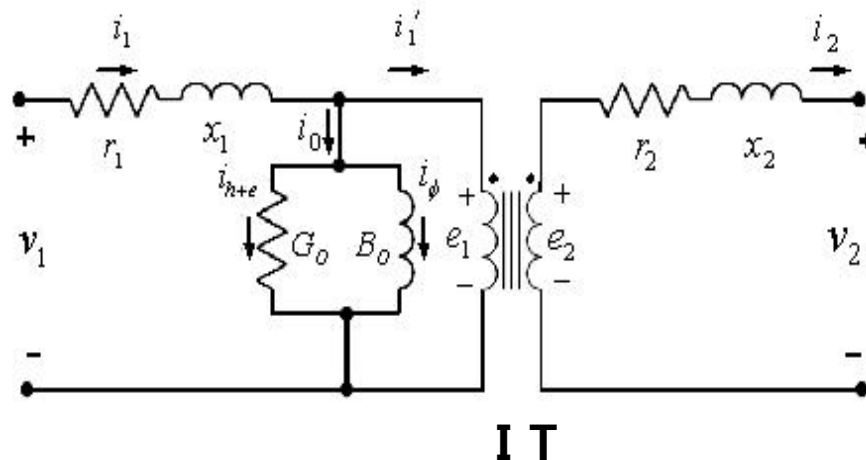
- | | | | |
|------------|------------------|--------|------------------------|
| - 여자 컨덕턴스 | $G'_o = a^2 G_o$ | - 철손전류 | $i'_{h+e} = a i_{h+e}$ |
| - 여자 서셉턴스 | $B'_o = a^2 B_o$ | - 자화전류 | $i'_\phi = a i_\phi$ |
| - 여자 어드미턴스 | $Y'_o = a^2 Y_o$ | - 여자전류 | $i'_o = a i_o$ |

<주의> 임피던스와 어드미턴스의 환산계수가 서로 다름에 유의

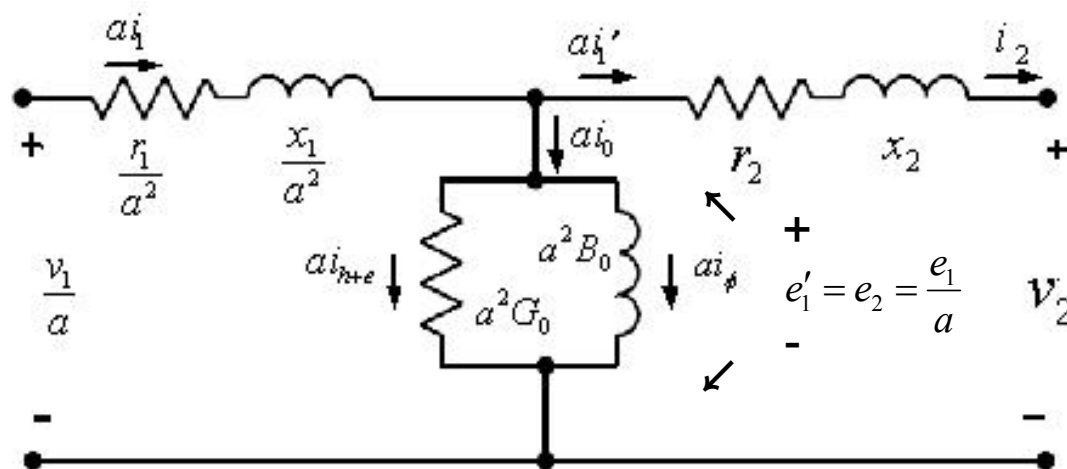
④ 변환후 1:1 권선비로 되므로 1차 및 2차 기전력이 동일함 $\rightarrow e'_1 = e_2 = \frac{e_1}{a}$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 1차를 2차로 환산한 회로

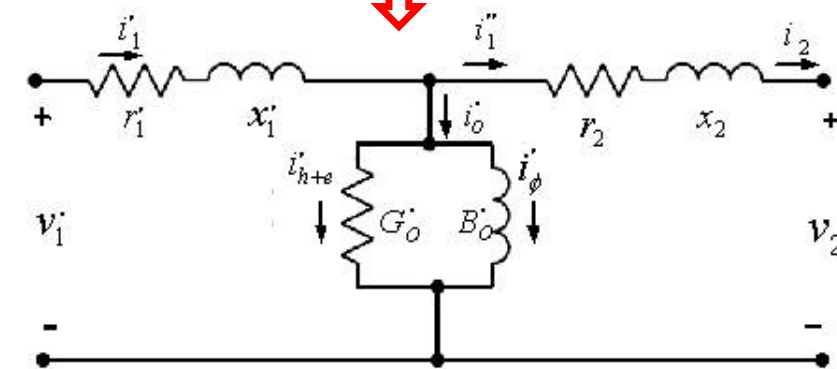
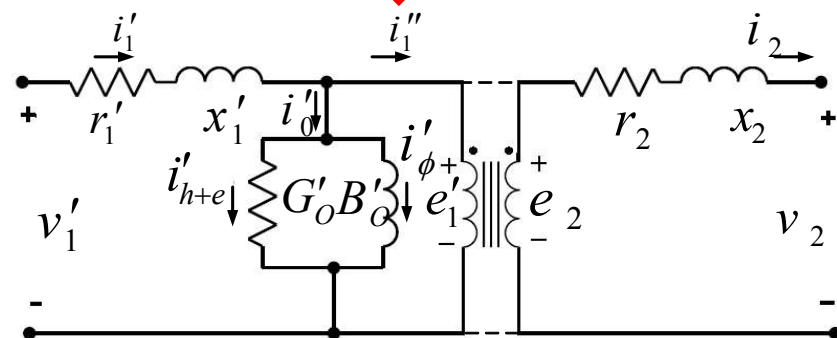
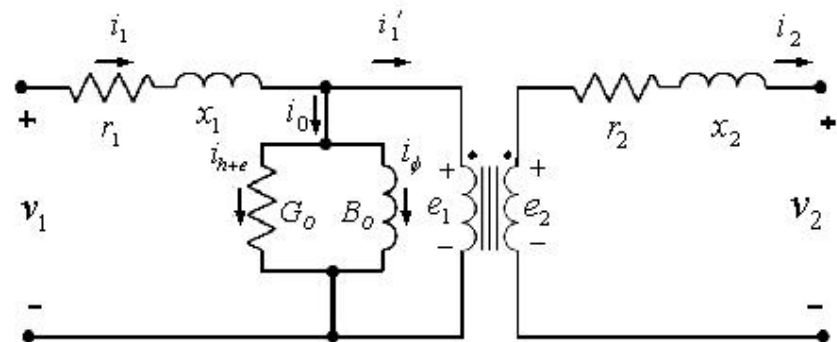
<환산전>



<환산후>



〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 1차를 2차로 변환



① N_1/N_2 의 변압기에서

- 권선비 a 를 구하여 1차전압 $e_1'(t)$ 를 $e_1'(t) = e_1(t)/a = e_2(t)$ 가 되도록 변환함

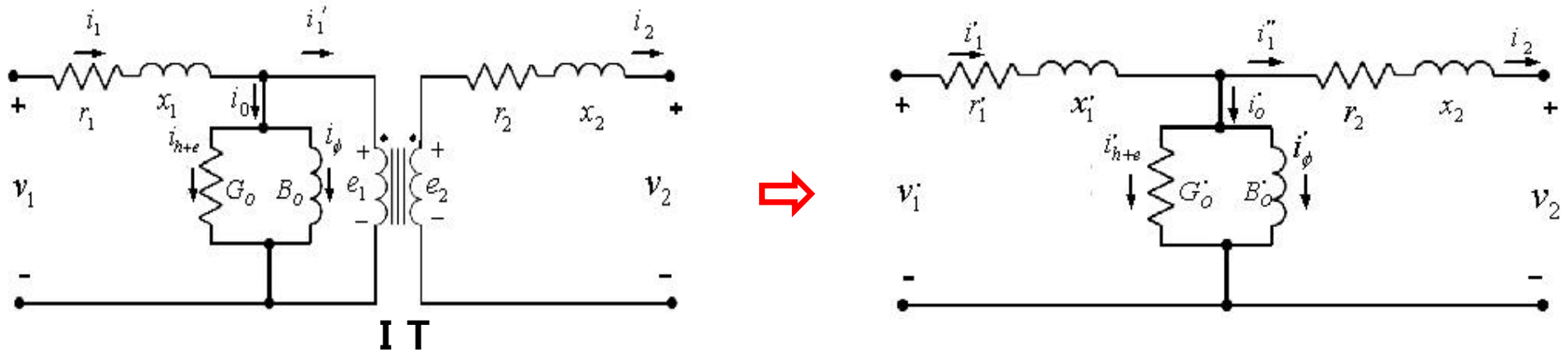
② 권선비가 1:1로 되었으므로

- 이상변압기 IT의 양단을 연결해도 같은 전위이므로 문제가 없음
- 1차측 값이 모두 변환(' 표시)되어 있음

③ 변압기가 없어진 간단한 형태

→ 1차를 2차로 환산한 등가회로 임

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 - 1차를 2차로 변환



① 환산계수를 이용하여 1차측의 모든 값들을 2차측으로 환산하면 됨

- 1차측 단자전압 (전원전압) $v_1' = \frac{v_1}{a}$

- 1차 전류(전원전류) $i_1' = ai_1$

- 1차 부하전류 (2차전류) $i_1'' = ai_1' = i_2$

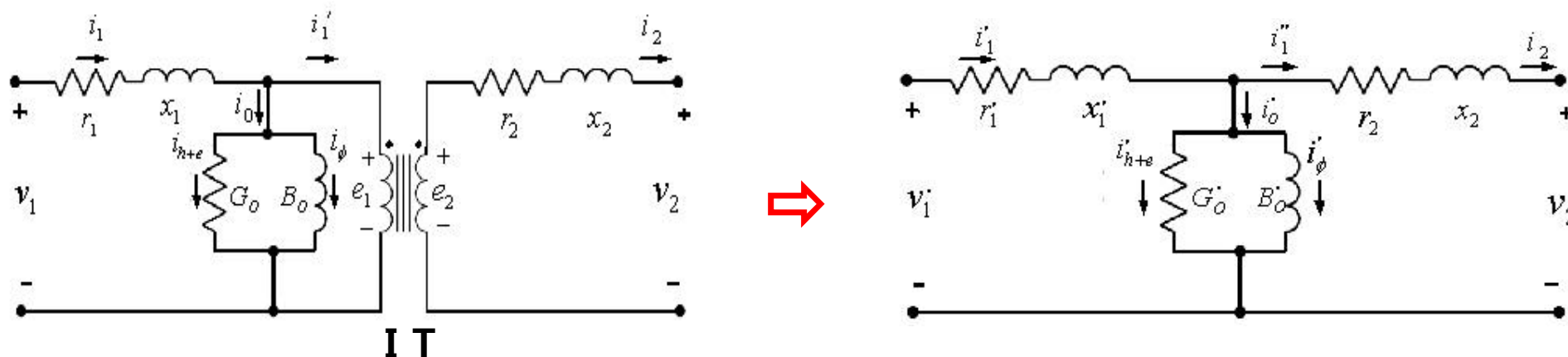
- 1차 권선저항 $r_1' = \frac{r_1}{a^2}$

- 1차 누설리액턴스 $x_1' = \frac{x_1}{a^2}$

<주의> $i_1'' \equiv (i_1')'$; 1차부하전류 i_1' 를 2차로 변환한 값

② 변환후 1:1 권선비로 되므로 1차 및 2차 기전력이 동일함 $\rightarrow e_1' = e_2 = \frac{e_1}{a}$

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 - 1차를 2차로 변환



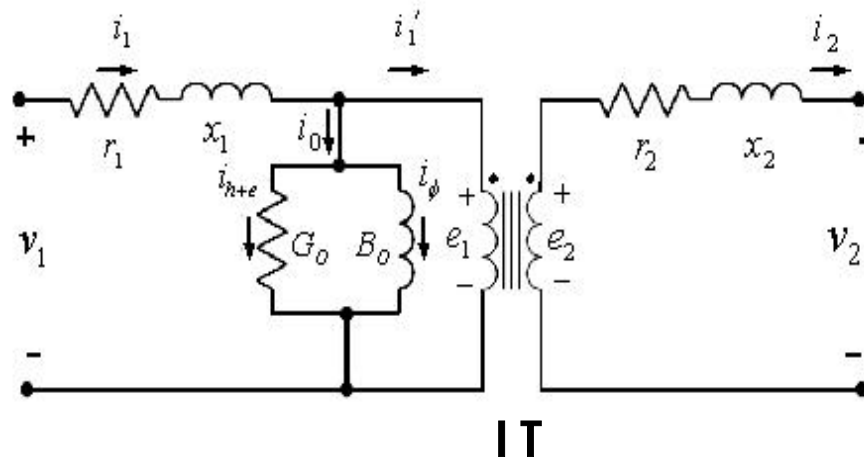
③ 여자회로에 있는 G_o' 와 B_o' 이 달라짐

- | | | | |
|------------|------------------|--------|------------------------|
| - 여자 컨덕턴스 | $G_o' = a^2 G_o$ | - 철손전류 | $i'_{h+e} = a i_{h+e}$ |
| - 여자 서셉턴스 | $B_o' = a^2 B_o$ | - 자화전류 | $i'_\phi = a i_\phi$ |
| - 여자 어드미턴스 | $Y_o' = a^2 Y_o$ | - 여자전류 | $i'_o = a i_o$ |

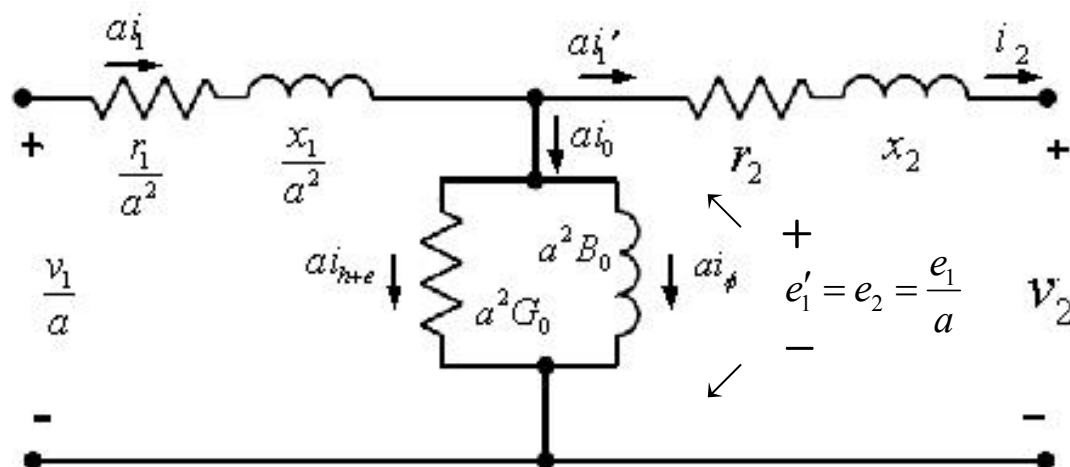
<주의> 임피던스와 어드미턴스의 환산계수가 서로 다름에 유의

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 1차를 2차로 환산한 회로

〈환산전〉



〈환산후〉



〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 환산계수 정리

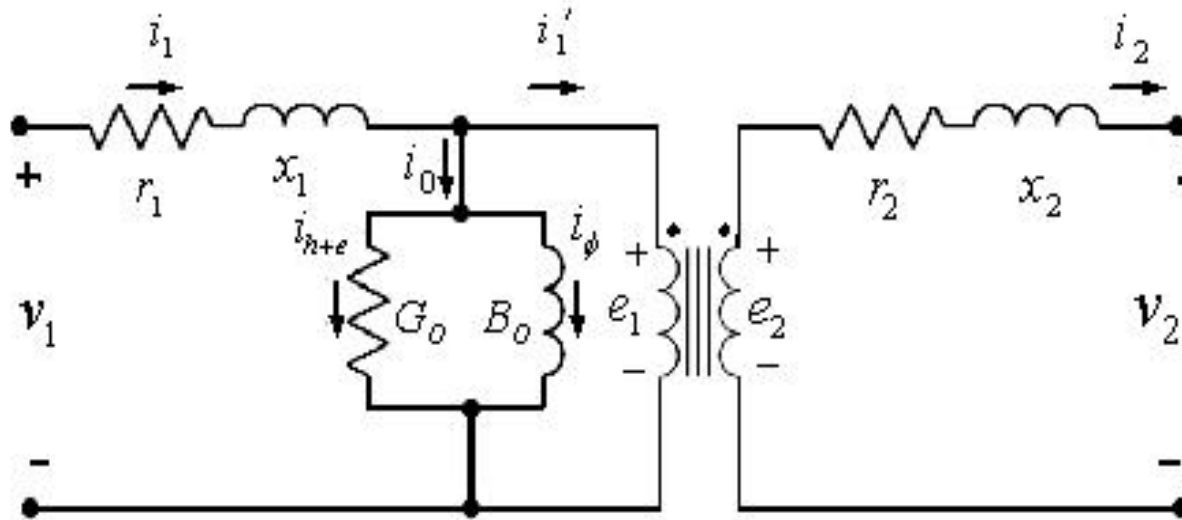
<주의> 1차의 값을 2차로 환산한 경우를 나타냄

환산대상	환산전	환산후	환산계수
1차 권선수	N_1	$N'_1 = N_1/a$	$1/a$
1차 저항	r_1	$r'_1 = r_1/a^2$	$1/a^2$
1차 리액턴스	x_1	$x'_1 = x_1/a^2$	$1/a^2$
1차 어드미턴스	Y_O	$Y'_O = a^2 Y_O$	a^2
1차 전압	V_1	$V'_1 = V_1/a$	$1/a$
1차 전류	I_1	$I'_1 = a I_1$	a
1차 동손	P_{C1}	$P'_{C1} = P_{C1}$	1
1차 입력	P_1	$P'_1 = P_1$	1

〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 무부하의 경우

실제 변압기에서 2차측 단자에 부하가 연결되지 않는 경우를 생각해 보자.
2차전류, 즉 부하전류 $i_2 = 0$ 이므로 1차 부하전류는 다음의 관계식에서

$$\frac{i_1'}{i_2} = \frac{1}{a} \rightarrow \text{1차 부하전류 } i_1' = 0$$

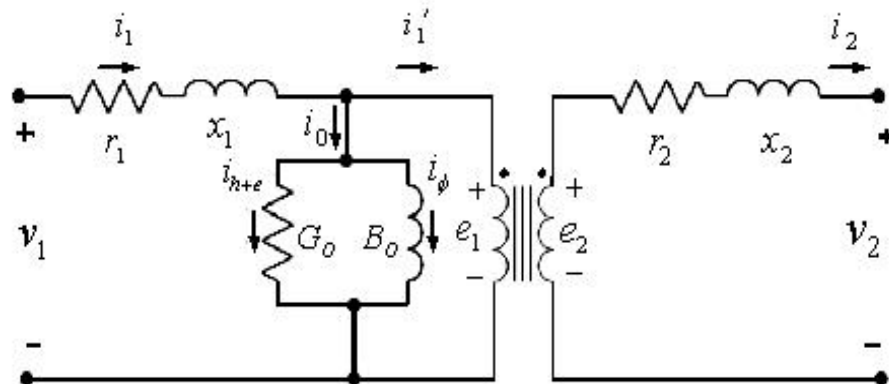


1차 전류가 $i_1 = i_1' + i_0$ 인데 1차 부하전류가 0 이므로

$\therefore i_1 = i_0 \rightarrow$ 무부하전류와 여자전류는 같은 의미임

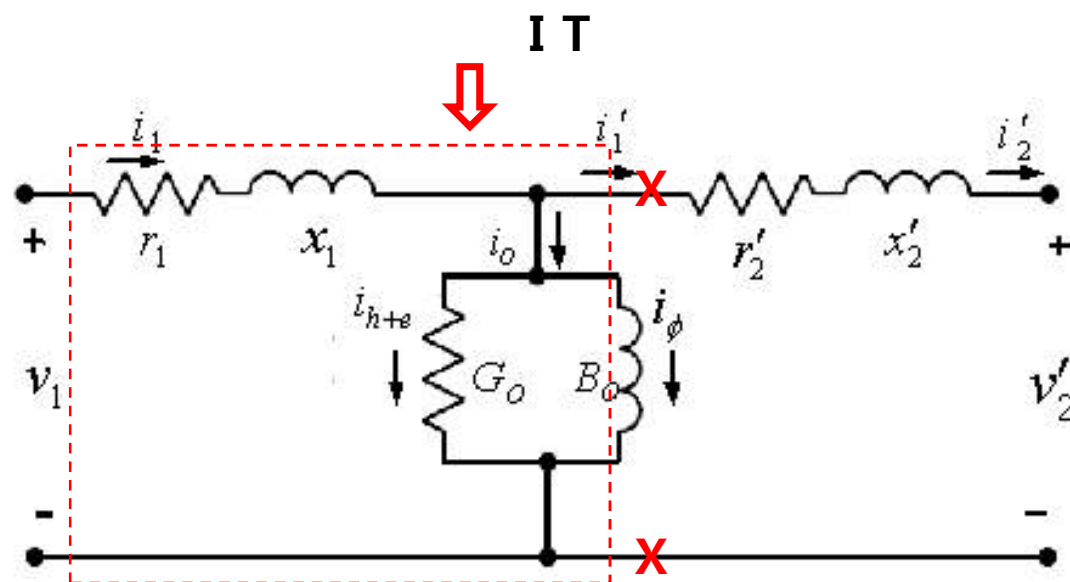
〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 무부하 등가회로

무부하의 경우를 등가회로에서 다시 나타내 보면 다음과 같다.



1차 부하전류 및 2차 전류가 모두 0 이므로
이상변압기 I T 의 입력전류 $i_1' = 0$ 이다.

따라서, 이상변압기의 입력전류가 없어도
변압기에는 전압이 계속 발생되어야 하고
이를 위해 자속이 생겨야 한다.

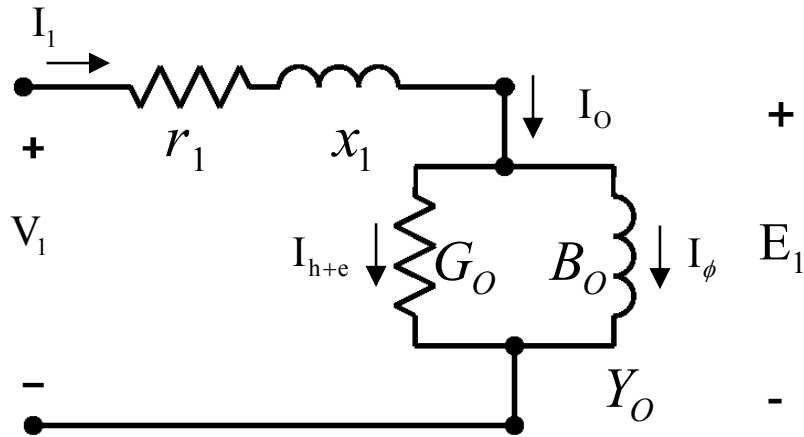


B_O 가 존재하는 여자회로가지는
바로 자화전류 i_ϕ 가 흐를 수 있는
가상적인 경로를 만들어 준 것임

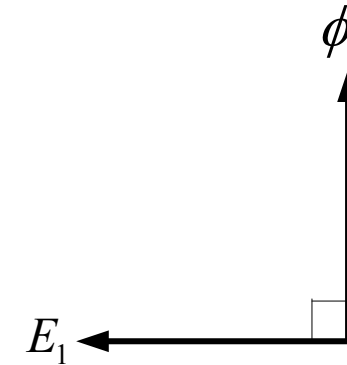
이 부분을 변압기의 무부하 등가회로 라고 함

<제2장> 2.5 변압기의 회로해석 – 무부하 등가회로

아래의 모든 값들은 페이서(phasor)임.



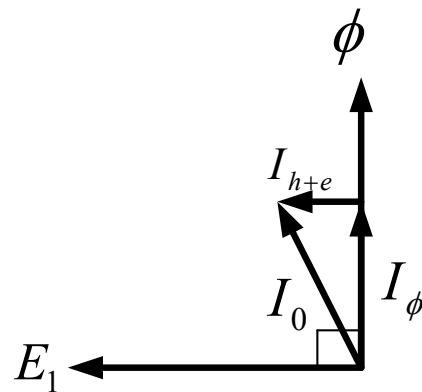
<무부하 등가회로>



<자속과 1차 기전력의 벡터선도>

- $E_1 \perp \phi$; 90도 위상차
(자속 ϕ // 자화전류 I_ϕ)

- $E_1 = E_2'$ 위상차없음(동상)



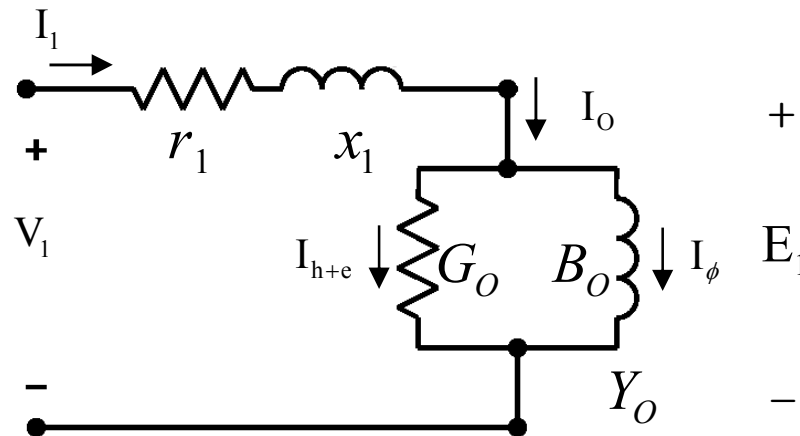
<무부하회로의 벡터선도>

- $I_{h+e} \perp I_\phi$; 90도 위상차

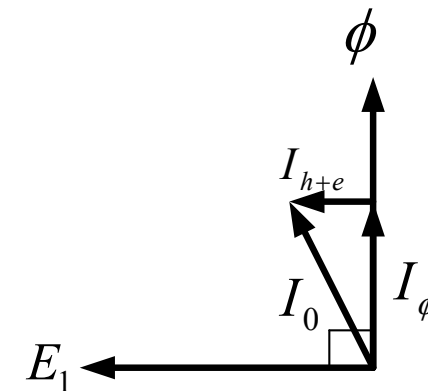
- $E_1 // I_{h+e}$; 위상차 없음(동상)

① 여자어드미턴스 $Y_O = G_O - jB_O$ 에서 여자전류를 구하면 $I_O = Y_O E_1 \dots\dots(1)$

<제2장> 2.5 변압기의 회로해석 – 무부하 등가회로



<무부하 등가회로>



여자전류 $I_O = I_{h+e} + jI_\phi$ 에 여자어드미턴스 $Y_O = G_O - jB_O$ 를 대입한다.

$$\therefore I_O = (G_O - jB_O)E_1 = G_O E_1 - jB_O E_1$$

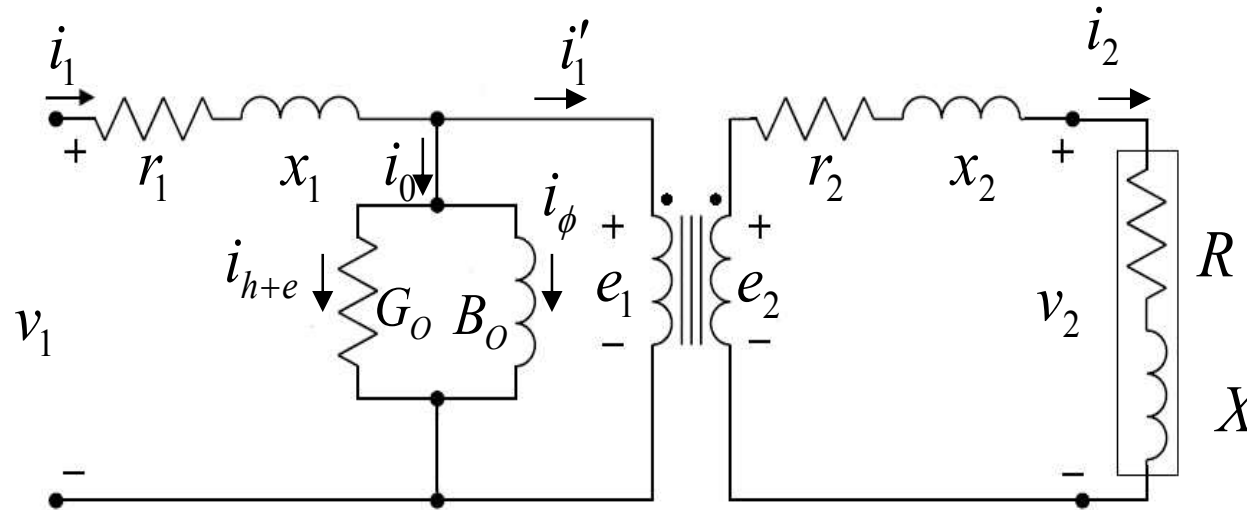
② 철손전류 $I_{h+e} = G_O E_1$

③ 자화전류 $I_\phi = -B_O E_1$

와 같이 계수를 비교하여 얻어진다.

〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 부하가 연결된 경우

지금 변압기의 출력측에 부하 $R + jX$ 가 연결된 경우를 생각해 보자.



지금까지 구한 몇가지 관계식을 페이서형태로 변환하면 다음과 같다.

$$\textcircled{1} \quad v_1(t) = e_1(t) + e_{l1}(t) \quad \rightarrow \quad V_1 = E_1 + (r_1 + jx_1)I_1$$

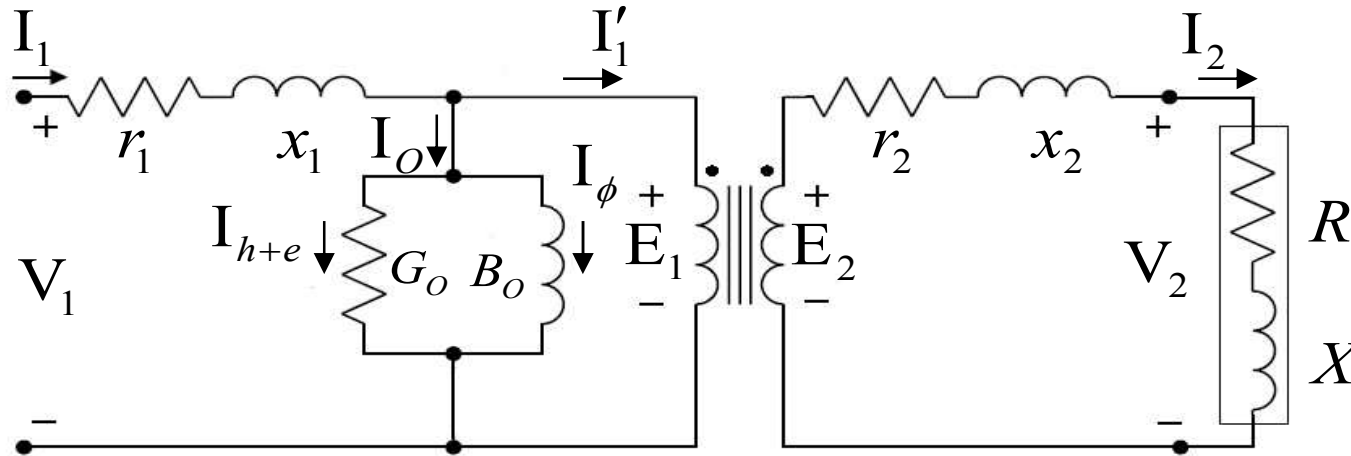
$$\textcircled{2} \quad i_1(t) = i_o(t) + i'_1(t) \quad \rightarrow \quad I_1 = I_O + I'_1$$

$$\textcircled{3} \quad i_o(t) = i_\phi(t) + i_{h+e}(t) \quad \rightarrow \quad I_O = I_\phi + I_{h+e}$$

$$\textcircled{4} \quad e_2(t) = v_2(t) + e_{l2}(t) \quad \rightarrow \quad E_2 = V_2 + (r_2 + jx_2)I_2$$

<제2장> 2.5 변압기의 회로해석 - 부하시 해석

지금 변압기의 출력측에 부하 $R + jX$ 가 연결된 경우를 생각해 보자.



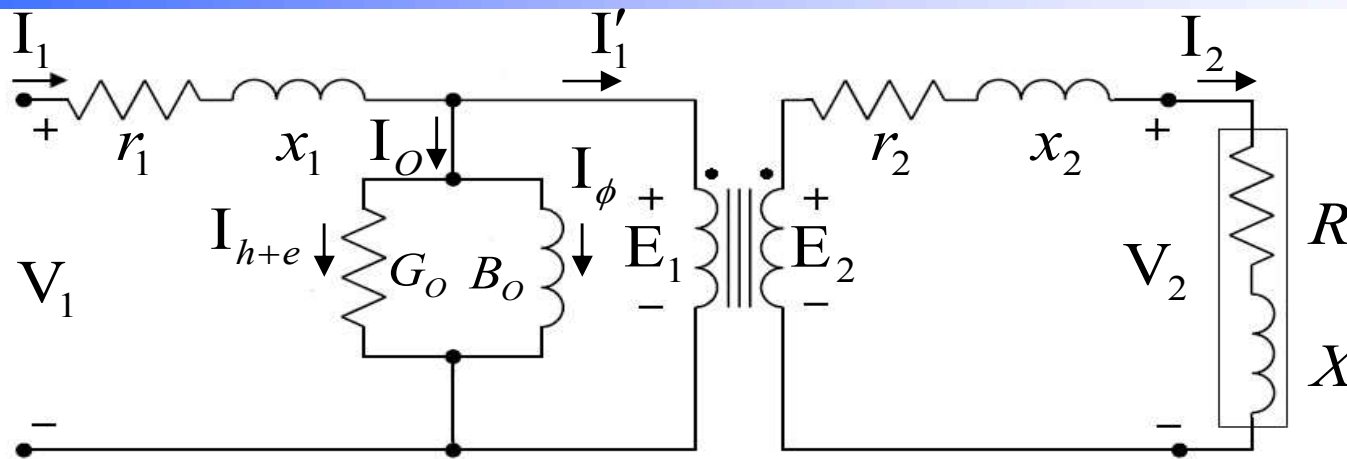
② 2차회로 내 존재하는 총 어드미턴스를 구하면 $\therefore Y = \frac{1}{(R + r_2) + j(X + x_2)}$

또, 2차전류 $I_2 = YE_2 = \frac{YE_1}{a} \dots\dots\dots(2)$

로 구해지므로 이로부터 1차 부하전류는 다음과 같이 얻어진다.

③ 1차부하전류 $I'_1 = \frac{I_2}{a} = \frac{YE_1}{a^2} \dots\dots\dots(3)$

〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 부하시 1차 및 2차 전류비



④ 1차전류 $I_1 = I_0 + I'_1$ 이므로 앞의 관계를 대입하여 정리하면

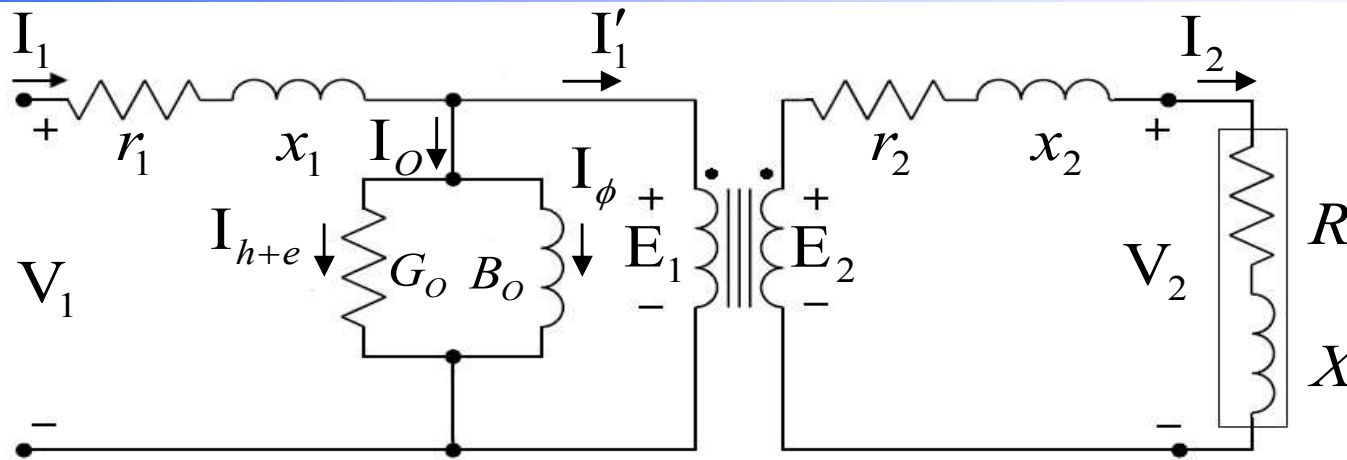
$$\therefore I_1 = I_0 + I'_1 = \frac{(a^2 Y_0 + Y)E_1}{a^2} \dots\dots\dots(4) \qquad I_2 = YE_2 = \frac{YE_1}{a} \dots\dots\dots(2)$$

⑤ 1차전류 및 2차전류의 비는 식(2)와 (4)에서 얻을 수 있다

$$\therefore \frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a} \cdot \left(1 + a^2 \frac{Y_0}{Y}\right) \dots\dots\dots(5)$$

<주의> 이상변압기의 전류비 $\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{a}$ 와 같게 되는 경우는 $Y \rightarrow \infty$ 즉 부하가 매우 클 경우에만(임피던스=0 즉, 단락이 되는 경우) 가능하다.

〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 부하가 연결된 경우



⑥ 1차전압 $V_1 = E_1 + (r_1 + jx_1)I_1$ 에서 1차 권선 임피던스를 다음과 같이 두면

$$z_1 = r_1 + jx_1 \quad \therefore V_1 = E_1 + z_1 I_1 \dots \dots \dots (6)$$

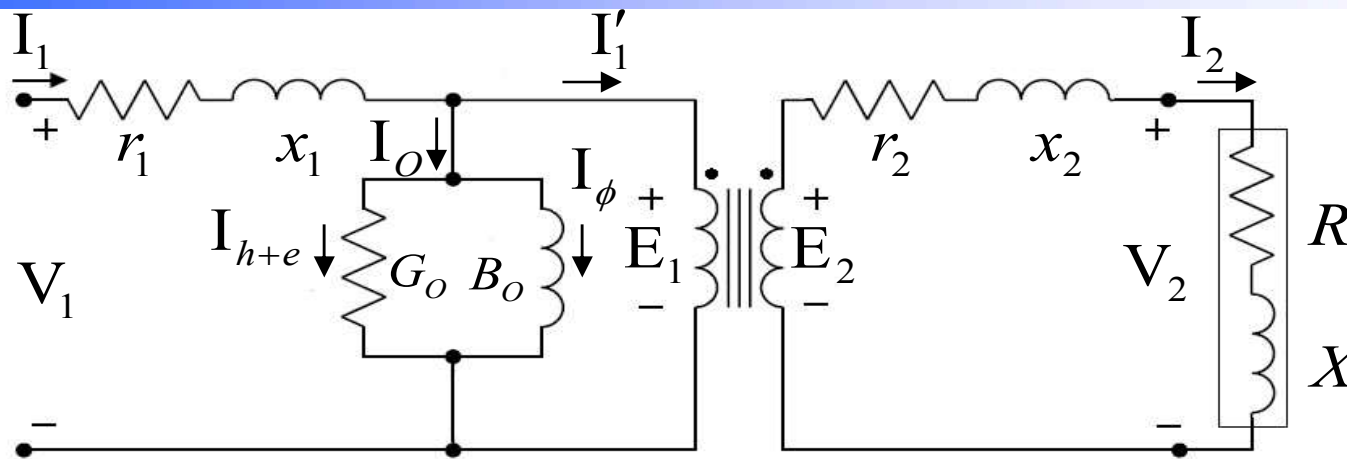
식(4)를 대입하여 정리하면 $\therefore V_1 = aE_2(1 + z_1 Y_O + z_1 Y / a^2) \dots \dots \dots (7)$

⑦ 2차전압 $E_2 = V_2 + (r_2 + jx_2)I_2$ 에서 2차 권선 임피던스를 다음과 같이 두면

$$z_2 = r_2 + jx_2 \quad \therefore V_2 = E_2 - z_2 I_2 \dots \dots \dots (8)$$

식(2)를 대입하여 정리하면 $\therefore V_2 = E_2(1 - z_2 Y) \dots \dots \dots (9)$

〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 부하시 1차 및 2차 전압비



⑧ 1차전압 및 2차전압의 비는 식(7)과 (9)에서 얻을 수 있다

$$\therefore \frac{V_1}{V_2} = a \cdot \frac{1 + z_1 Y_O + z_1 Y / a^2}{1 - z_2 Y} \dots\dots\dots(10)$$

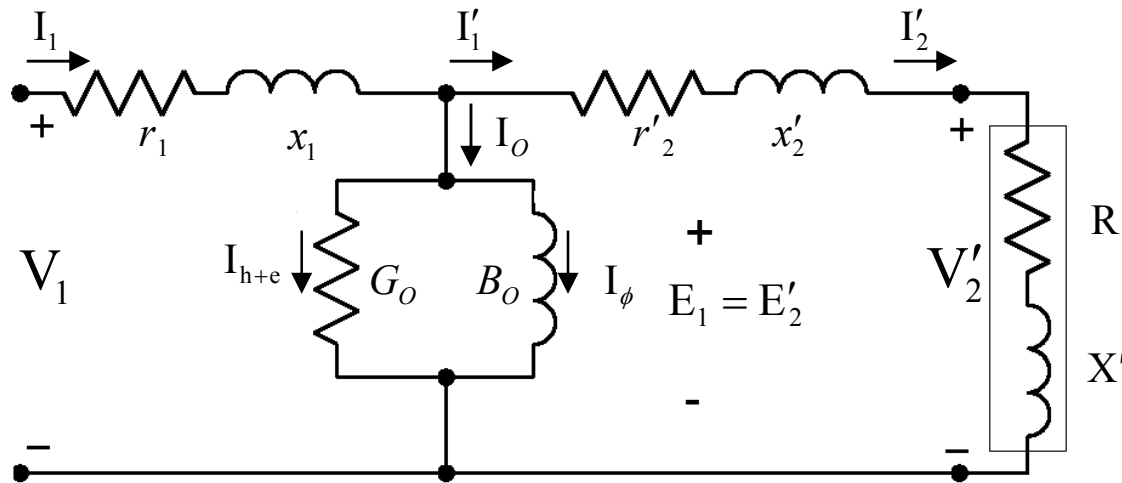
만약 부하가 제거되어 무부하로 되면 $Y = 0$ 로 되고 이때 전압비는 다음과 같다

$$\frac{V_1}{V_2} \approx a(1 + z_1 Y_O) \dots\dots\dots(11)$$

<주의> 실제변압기에서 보통 $z_1 Y_O \approx 0$ 의 조건을 만족하므로 이상변압기의 전압비 $V_1 / V_2 = a$ 와 같아지는 경우는 $Y = 0$ 즉 **무부하**일때만 근사적으로 가능하다.

근사등가회로 Approximate EQ Circuit

〈제2장〉 2.5 변압기의 회로해석 – 등가회로에서 관계식



등가회로에서
전압비 및 전류비를 구해 보자.

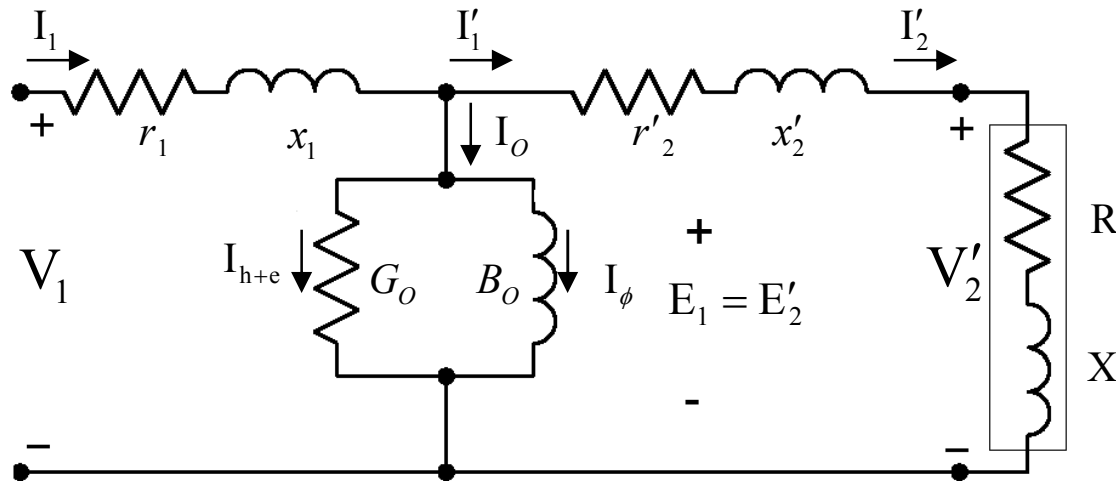
① 여자어드미턴스 $Y_O = G_O - jB_O$ 에서 여자전류를 구하면 $I_O = Y_O E_1 \dots\dots(1)$

② 2차내 총 어드미턴스 에서 2차전류를 구하면 $I'_1 = \frac{E_1}{(z'_2 + Z')} = I'_2 \dots\dots(2)$

③ 1차전류 $I_1 = I_O + I'_1$ 의 표현에 식(1) 및 (2)를 대입하면

$$I_1 = I_O + I'_1 = E_1 \left(Y_O + \frac{1}{z'_2 + Z'} \right) \dots\dots(3)$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 - 등가회로에서 관계식



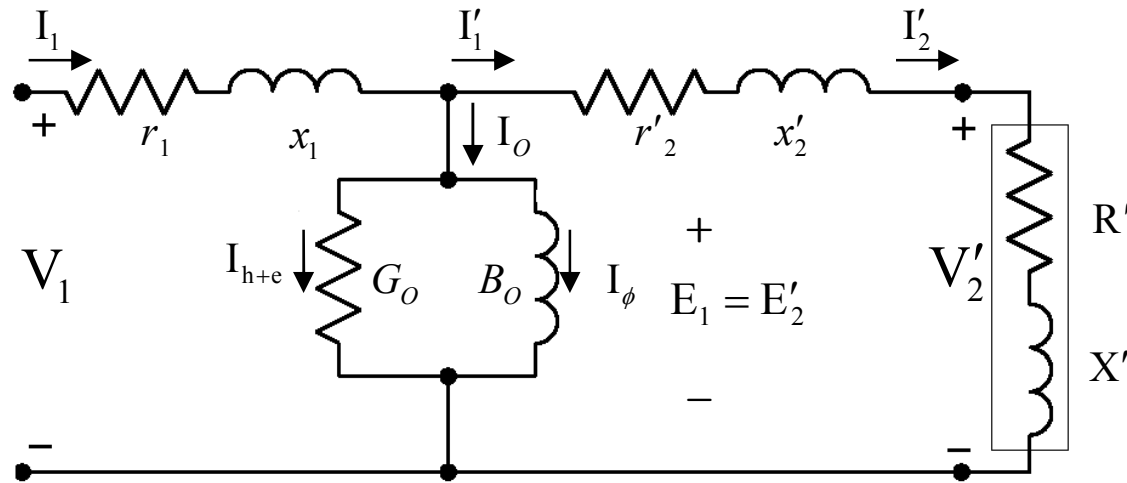
④ 1차회로측에서의 전압방정식 $V_1 = E_1 + z_1 I_1$ (4) 에 식(3)을 대입하면

$$\therefore V_1 = E_1 + z_1 I_1 = E_1 \left\{ 1 + z_1 \left(Y_O + \frac{1}{z'_2 + Z'} \right) \right\} \text{.....(5)}$$

⑤ 2차회로측에서의 전압방정식 $V'_2 = E_1 - z'_2 I'_1$ (6) 에 식(2)을 대입하면

$$\therefore V'_2 = E_1 - z'_2 I'_1 = E_1 \cdot \frac{Z'}{z'_2 + Z'} \text{.....(7)}$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 - 등가회로에서 관계식



⑥ 전압비를 식(5) 및 (7)에서 구하면

$$\therefore \frac{V_1}{V'_2} = \frac{z'_2 + Z'}{Z'} \cdot \left(1 + z_1 Y_o + \frac{z_1}{z'_2 + Z'}\right) = 1 + \frac{z_1 + z'_2 + z_1 Y_o}{Z'} \dots\dots\dots(8)$$

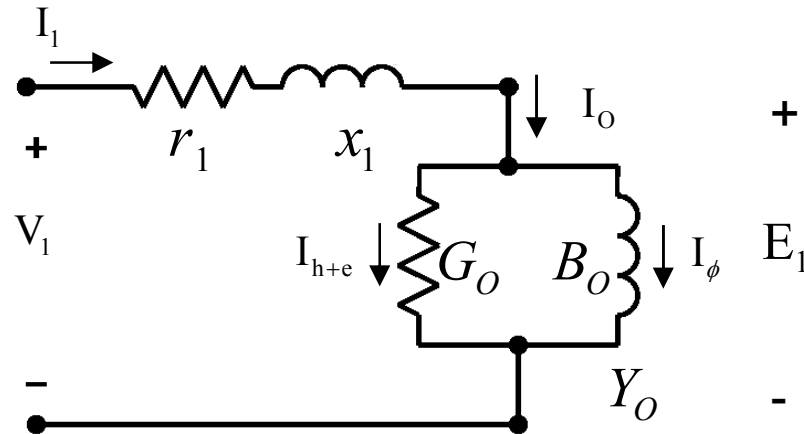
⑦ 전류비를 식(2) 및 (3)에서 구하면

$$\therefore \frac{I_1}{I'_2} = (z'_2 + Z') \cdot \left(Y_o + \frac{1}{z'_2 + Z'}\right) = 1 + (z'_2 + Z') \cdot Y_o \dots\dots\dots(9)$$

이상의 표현에서 보면 이상변압기의 전압비 및 전류비와 전혀 유사함이 없음

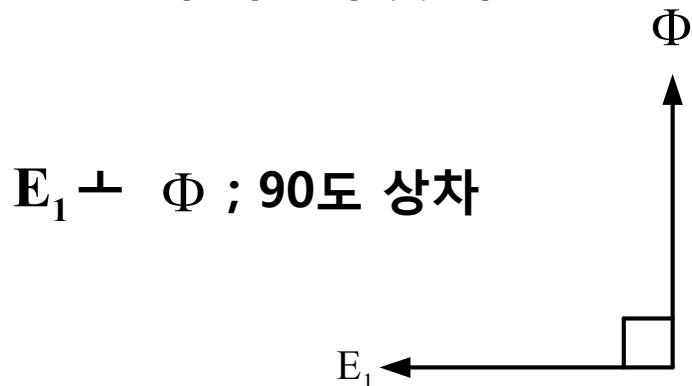
〈제2장〉 2.5 변압기의 벡터선도 – 무부하의 경우

실제변압기에 대한 해석을 통해 얻어진 관계식으로 무부하시 벡터선도를 구해보자



위의 무부하 벡터선도를 다음의 순서를 따라 구해보자

① 1차 기전력 및 자속

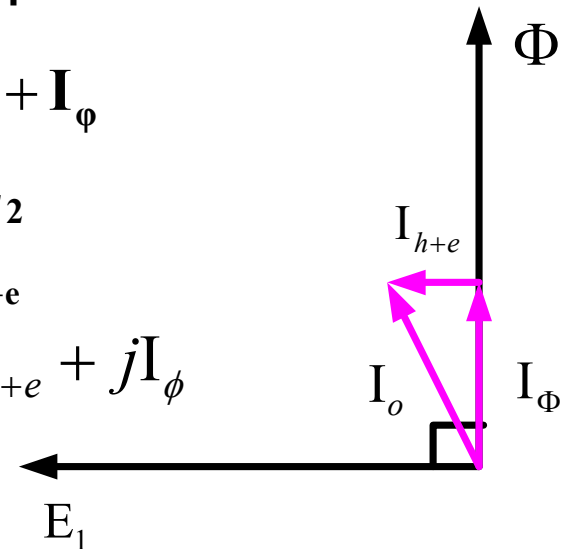


② $I_0 = I_{h+e} + I_\phi$

$$E_1 = aE_2$$

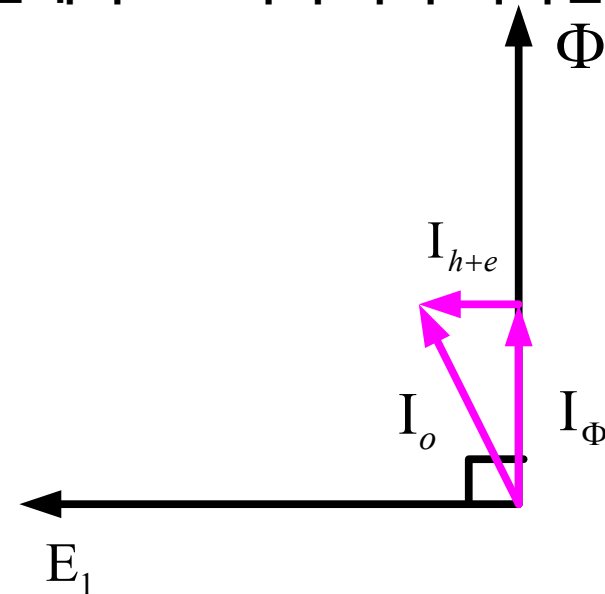
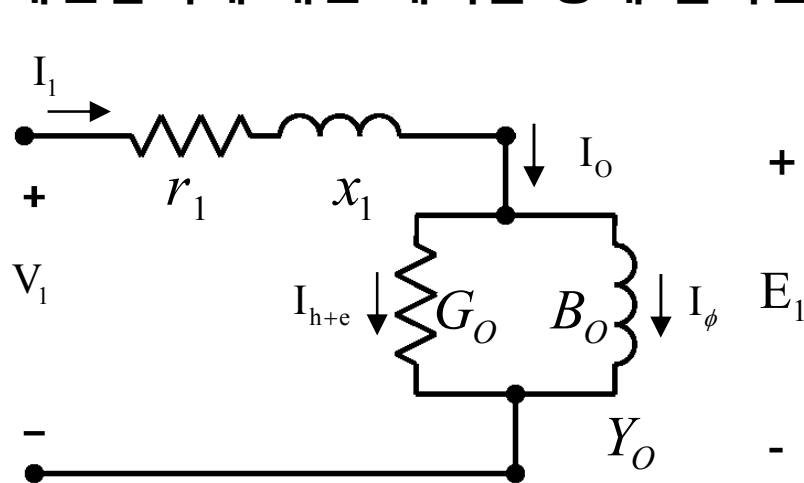
$$E_1 // I_{h+e}$$

$$I_0 = I_{h+e} + jI_\phi$$



〈제2장〉 2.5 변압기의 벡터선도 – 무부하의 경우

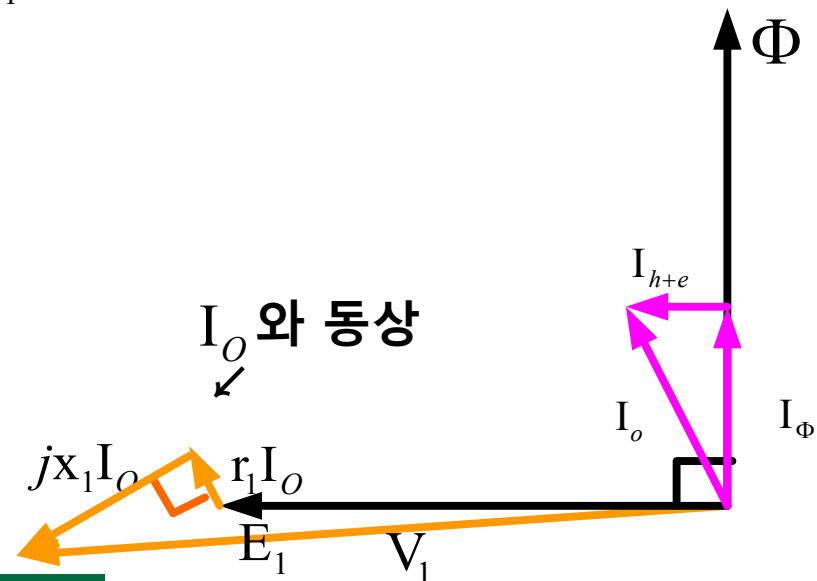
실제변압기에 대한 해석을 통해 얻어진 관계식으로 무부하시 벡터선도를 구해보자



1차전류와 여자전류는 동일하므로

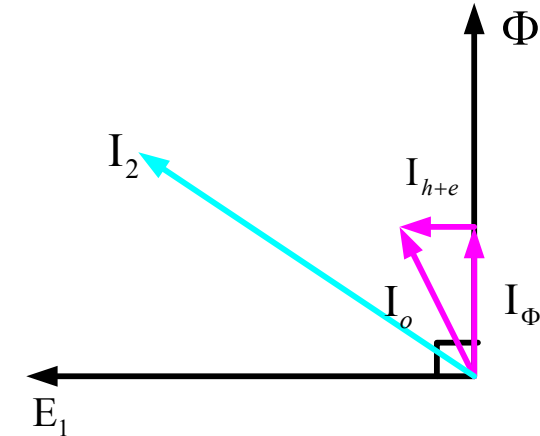
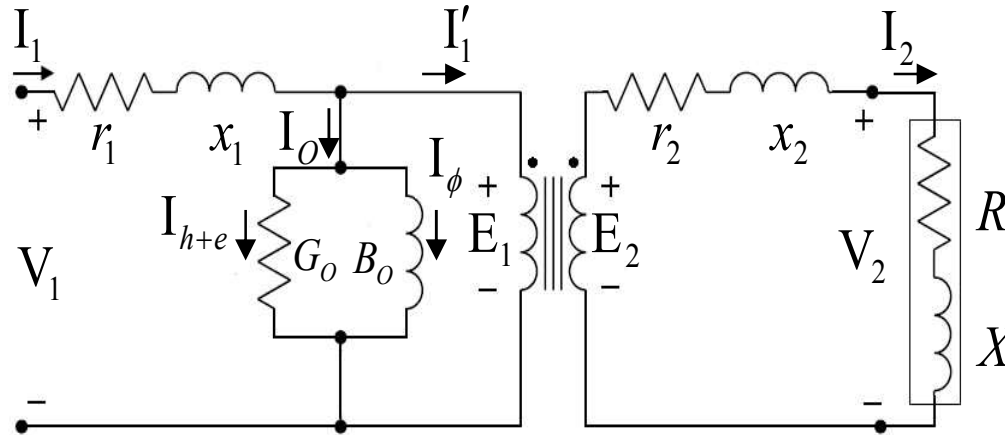
즉, $I_1 = I_o$ 의 조건을 사용하면

$$\textcircled{3} \quad V_1 = E_1 + (r_1 + jx_1)I_o$$



<제2장> 2.5 변압기의 벡터선도 - 부하가 연결된 경우

이번에는 실제변압기에 부하가 연결된 경우의 벡터선도를 구해보자

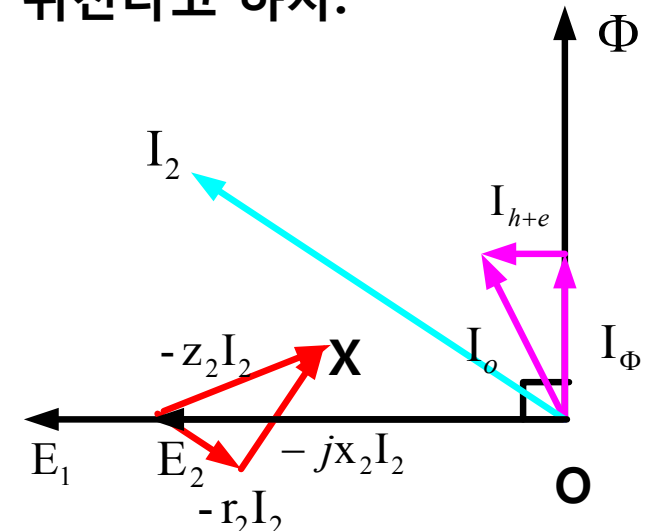


④ 2차회로의 벡터선도 - 2차 누설임피던스강하

- 먼저 부하전류 I_2 가 단자전압 V_2 에 비해 ϕ 만큼 뒤진다고 하자.
그 다음 2차 누설임피던스강하를 구하면 되는데,

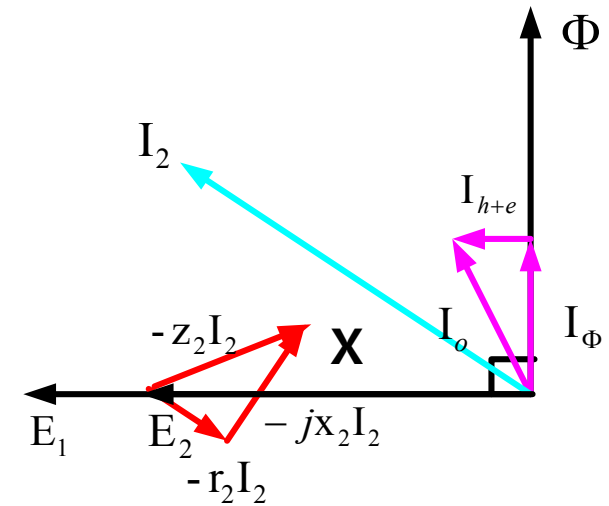
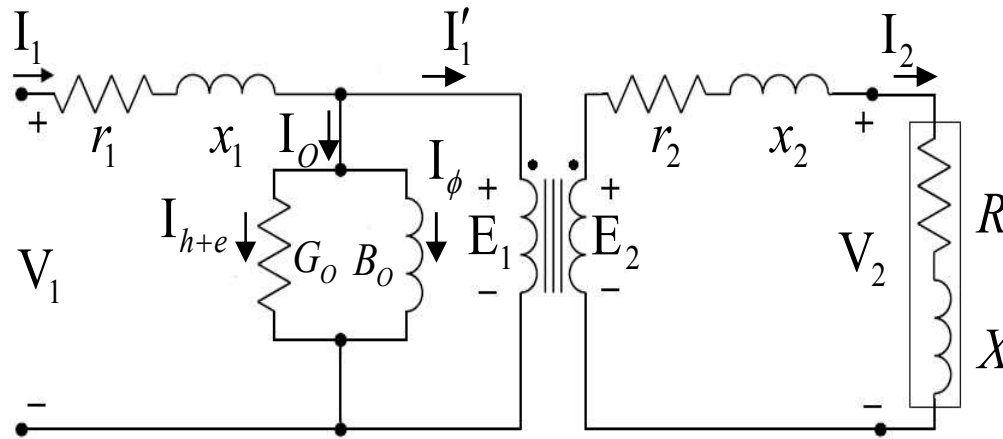
$$z_2 I_2 = (r_2 + jx_2) I_2 \rightarrow \text{점 X 에 해당함}$$

$$V_2 = E_2 - (r_2 + jx_2) I_2 \rightarrow \text{선분 O-X 에 해당함}$$



<제2장> 2.5 변압기의 벡터선도 - 부하가 연결된 경우

⑤ 2차회로의 벡터선도 - 부하양단전압



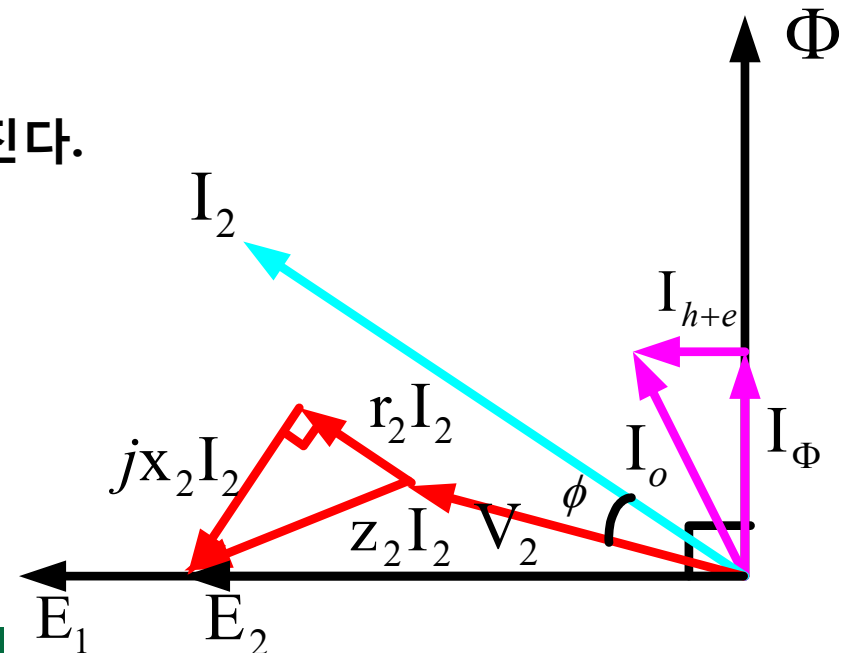
i) 2차 누설임피던스강하가 점 X 이므로

ii) 부하양단전압은 점 O와 연결하면 얻어진다.

$$\therefore V_2 = E_2 - (r_2 + jx_2)I_2$$

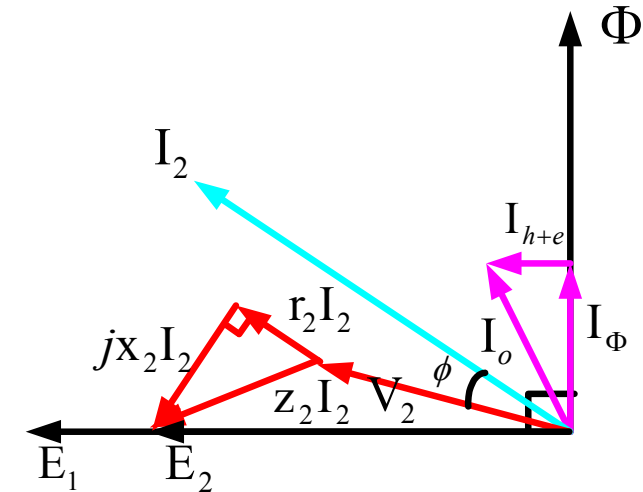
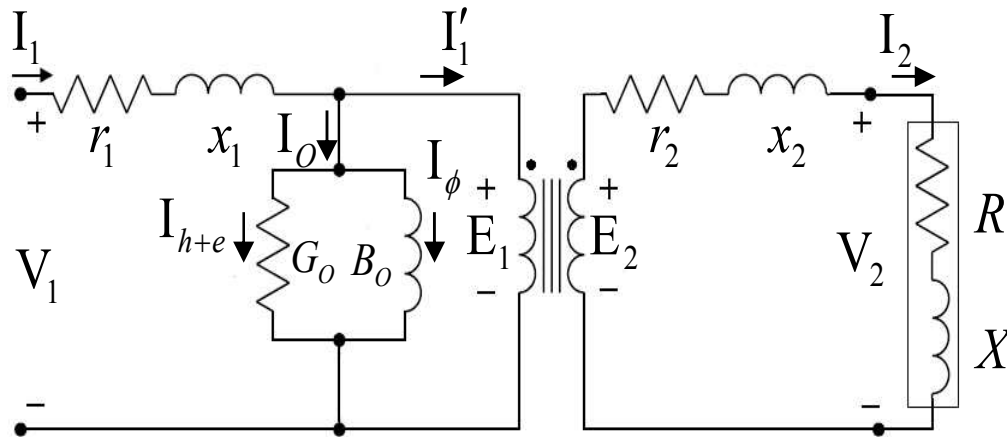
$$\text{즉, } E_2 = V_2 + r_2 I_2 + jx_2 I_2$$

부하전류 I_2 는 2차 단자전압 V_2 에 비해 위상 ϕ 만큼 늦어짐을 알 수 있다.



<제2장> 2.5 변압기의 벡터선도 - 부하가 연결된 경우

⑥ 1차 회로의 벡터선도 - 1차 부하전류



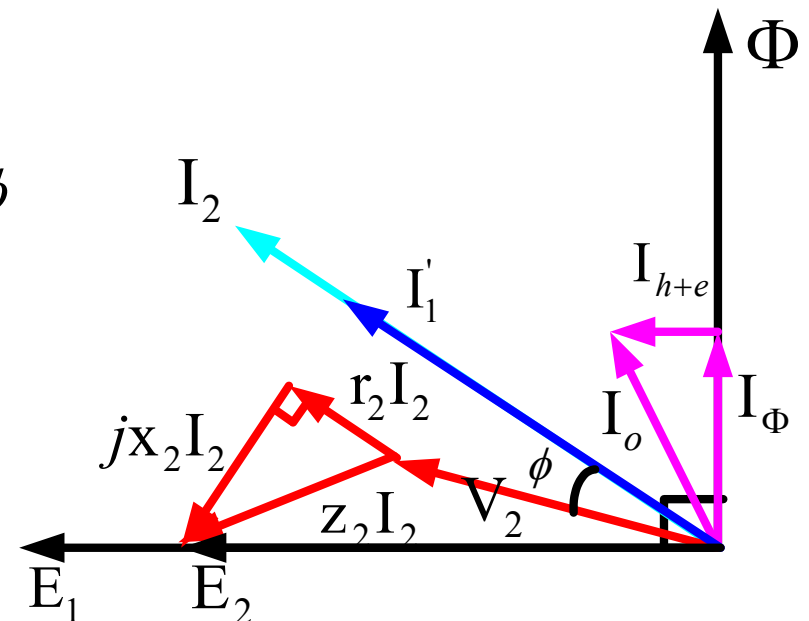
i) 부하전류 I_2 는 1차 부하전류 I'_1 와 동상임

ii) 크기는 권선비에 관련됨 $\rightarrow I'_1 = \frac{I_2}{a} \angle -\phi$

- 지금 권선비 $a > 1$ 인 변압기이라면

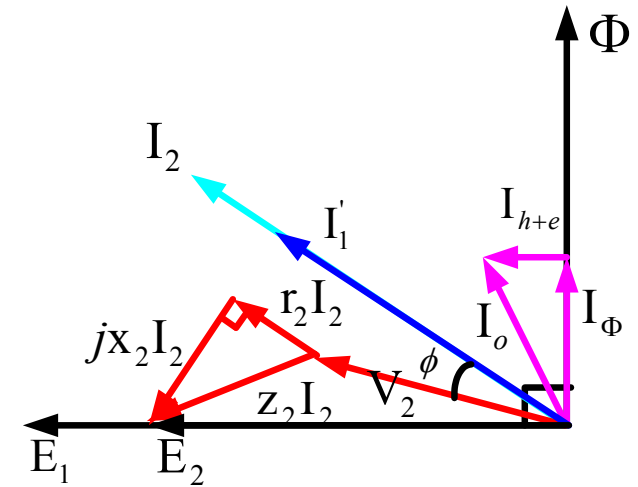
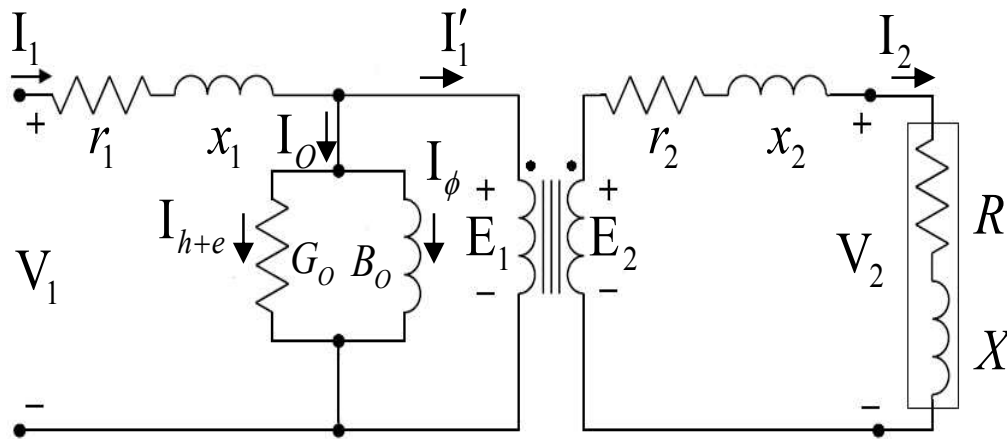
$I'_1 < I_2$ 인 관계가 얻어진다.

- 1차 부하전류도 2차 단자전압에 비해 ϕ 만큼 위상이 늦어지게 된다.



<제2장> 2.5 변압기의 벡터선도 - 부하가 연결된 경우

⑦ 1차 회로의 벡터선도 - 1차 전류

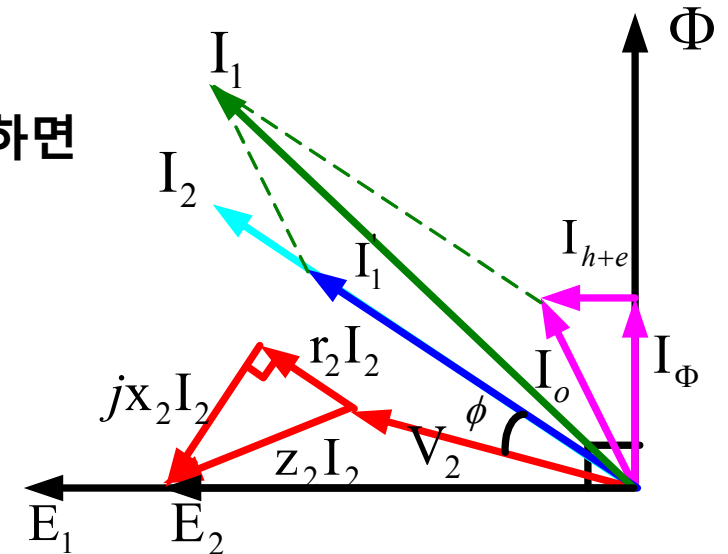


i) 1차부하전류 $I'_1 = \frac{|I_2|}{a} \angle -\phi$ 가 구해지면

ii) 앞에서 구한 여자전류 $I_0 = I_{h+e} + jI_\phi$ 와 합하면

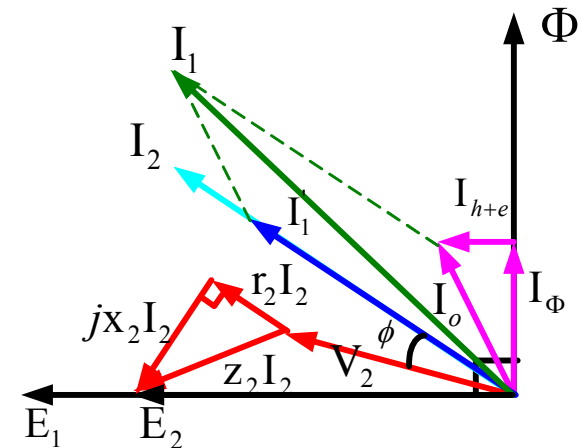
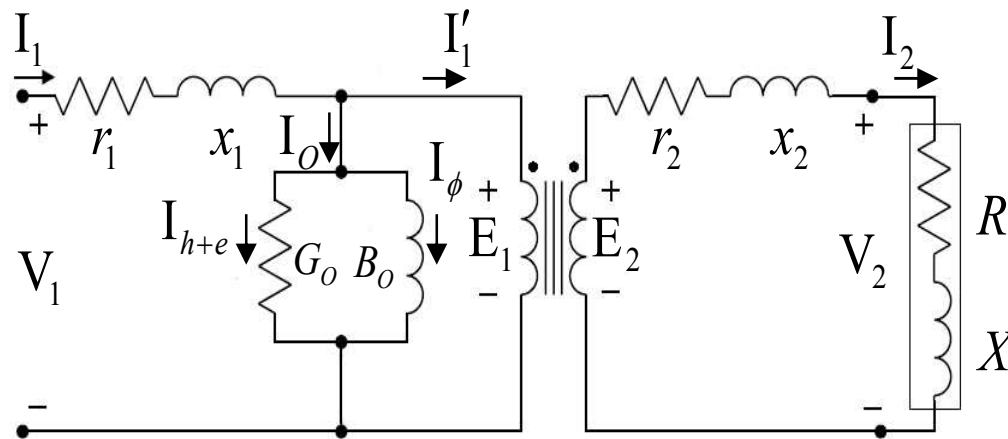
iii) 1차전류 I_1 을 얻을 수 있음

$$\therefore I_1 = I_0 + I'_1$$



<제2장> 2.5 변압기의 벡터선도 - 부하가 연결된 경우

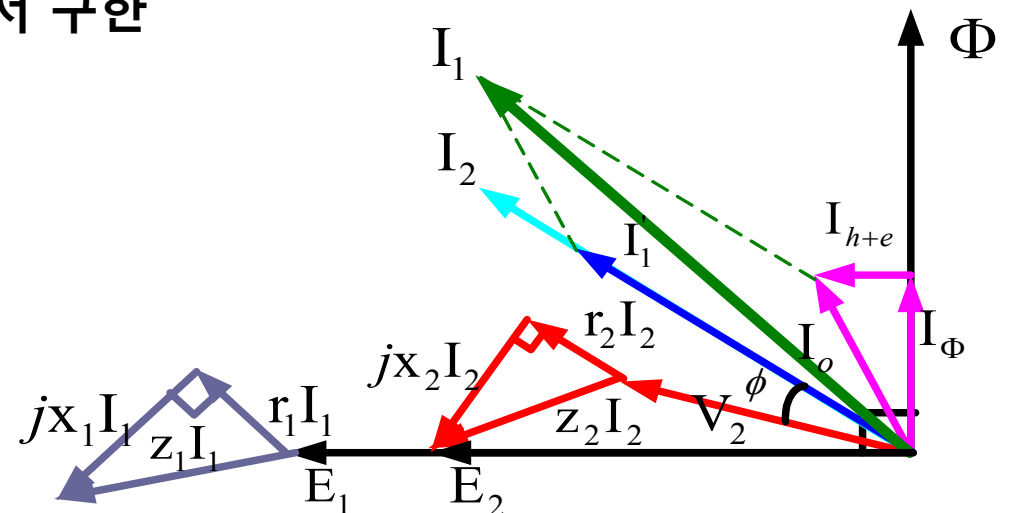
⑧ 1차 누설임피던스강하



1차 누설임피던스강하 $z_1 \mathbf{I}_1$ 는 앞에서 구한
1차전류만 주어지면 되므로

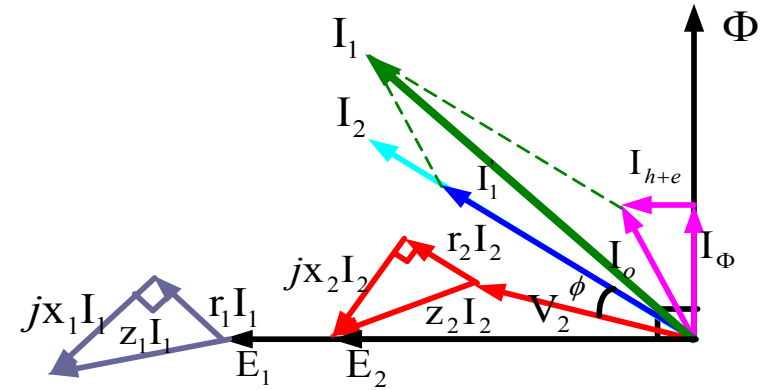
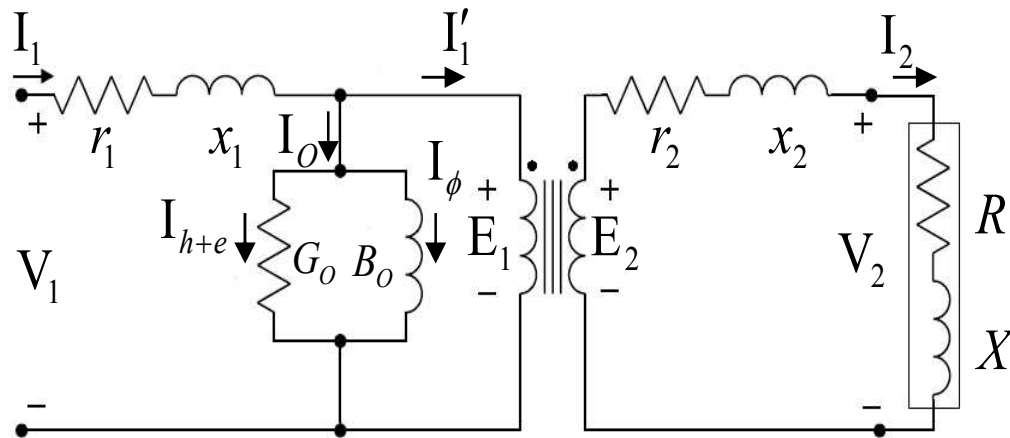
$$\therefore z_1 \mathbf{I}_1 = (r_1 + jx_1) \mathbf{I}_1$$

와 같이 얻어진다.



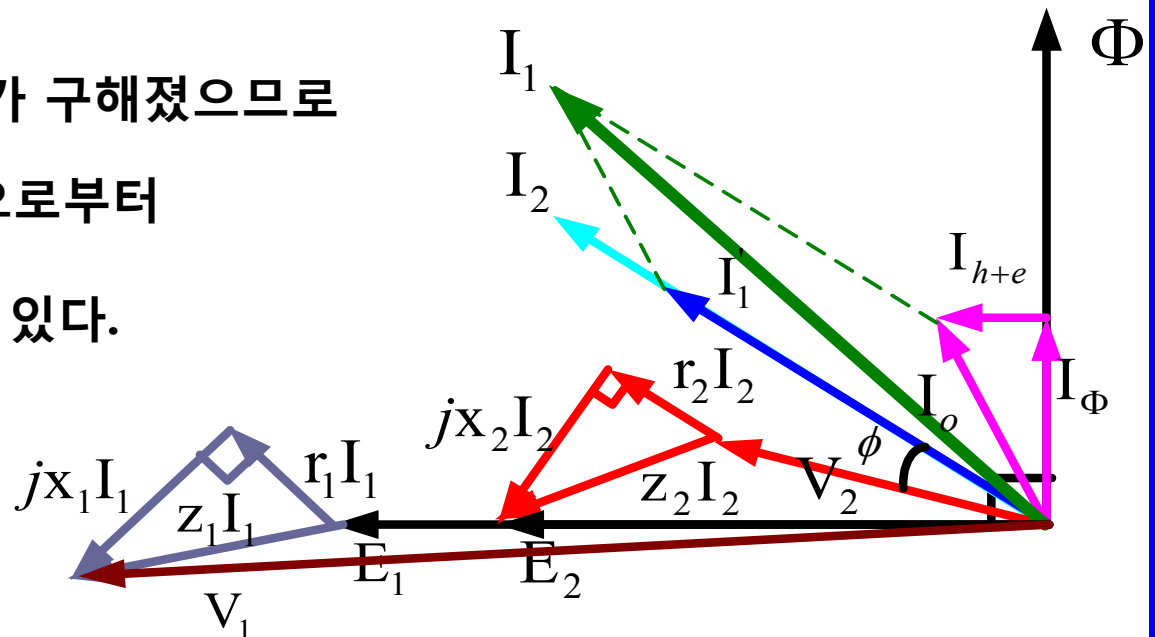
<제2장> 2.5 변압기의 벡터선도 - 부하가 연결된 경우

㉠ 1차 공급전압



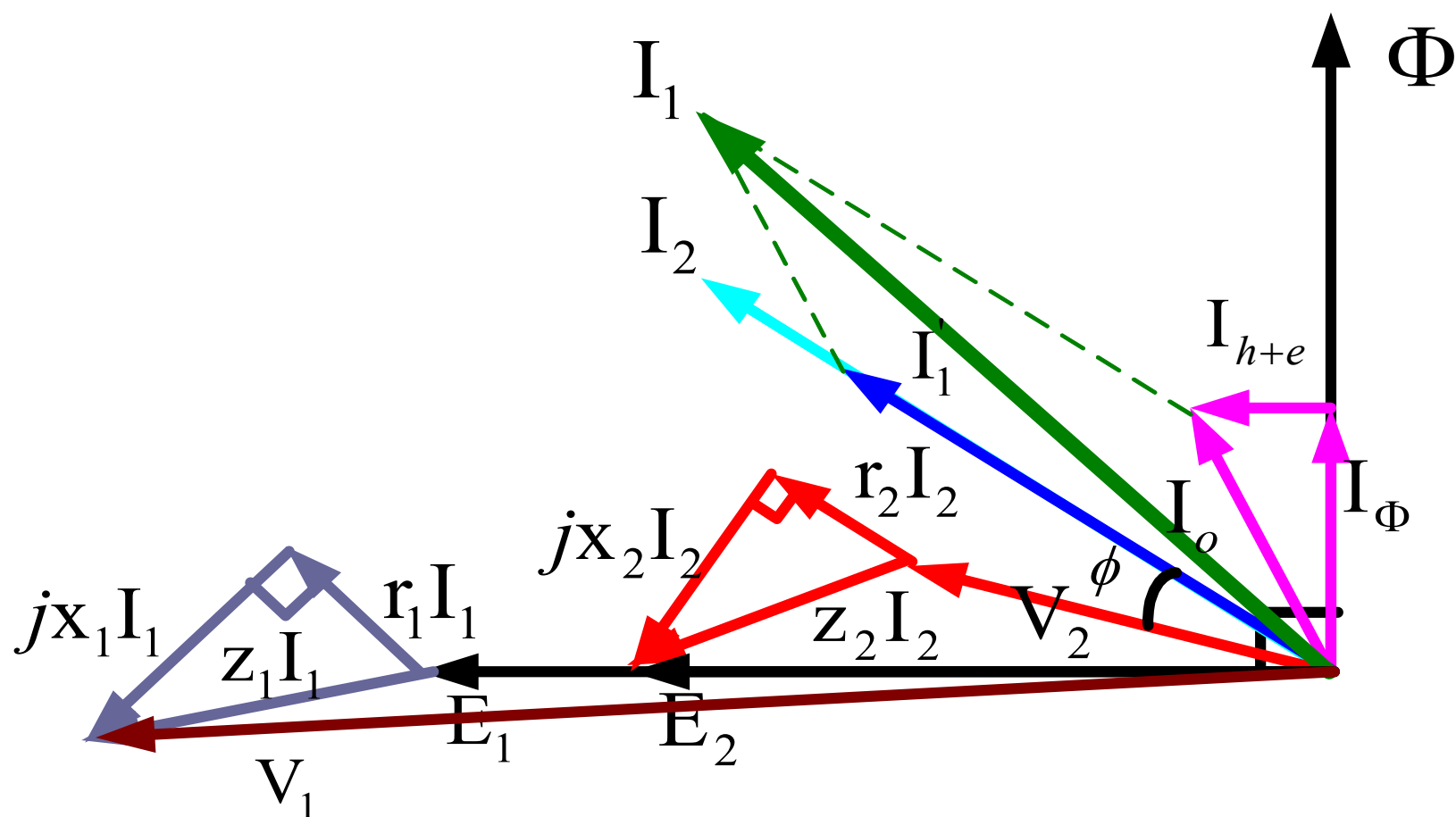
- 방금 1차 누설임피던스강하 $z_1 I_1$ 가 구해졌으므로
- 1차 유기기전력 E_1 과의 벡터합으로부터
1차 공급전압과의 관계를 얻을 수 있다.

$$\therefore V_1 = E_1 + (r_1 + jx_1)I_1$$



〈제2장〉 2.5 변압기의 벡터선도 – 전체 벡터선도

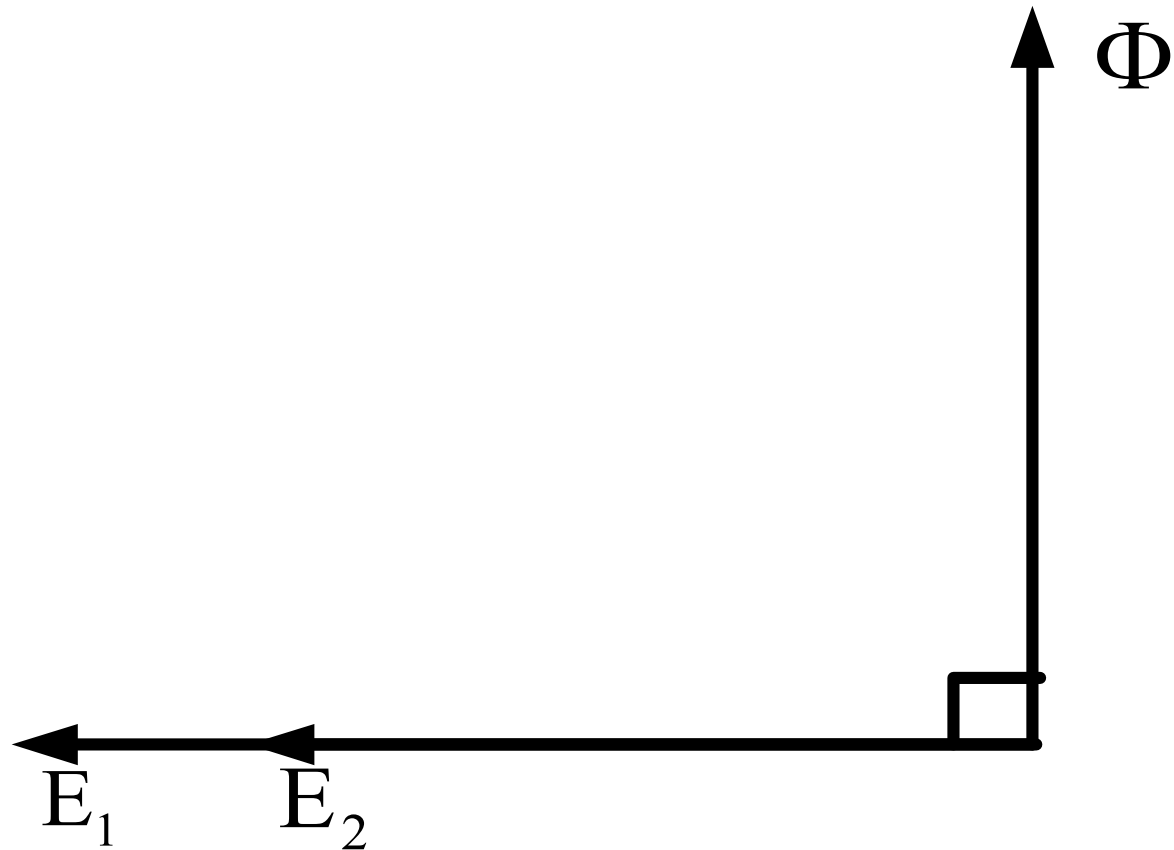
전기적 등가회로를 토대로 하여 실제변압기의 벡터선도를 정리하면 다음과 같다



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

무부하시 벡터선도 1

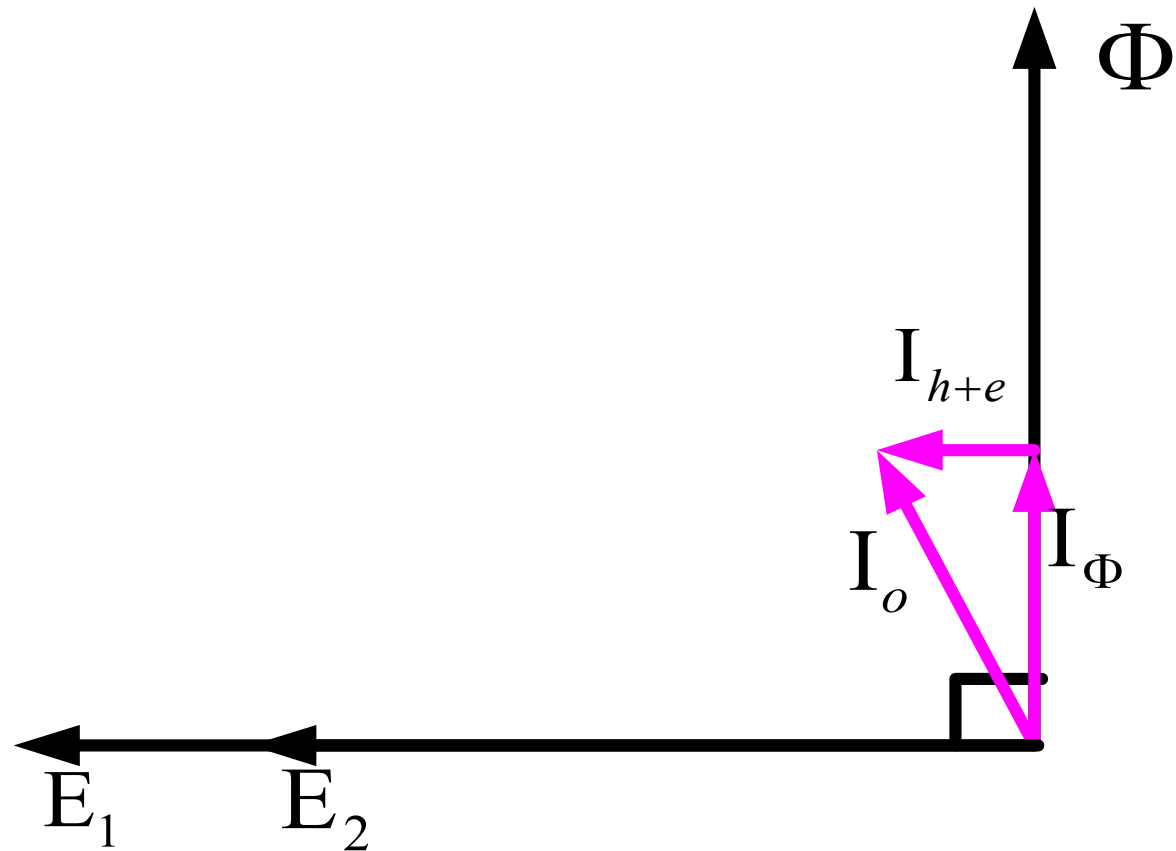
1차 유기기전력 E_1 및 E_2 와, 자속 Φ 의 관계를 먼저 설정함 (Faraday 법칙)



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

무부하시 벡터선도 2

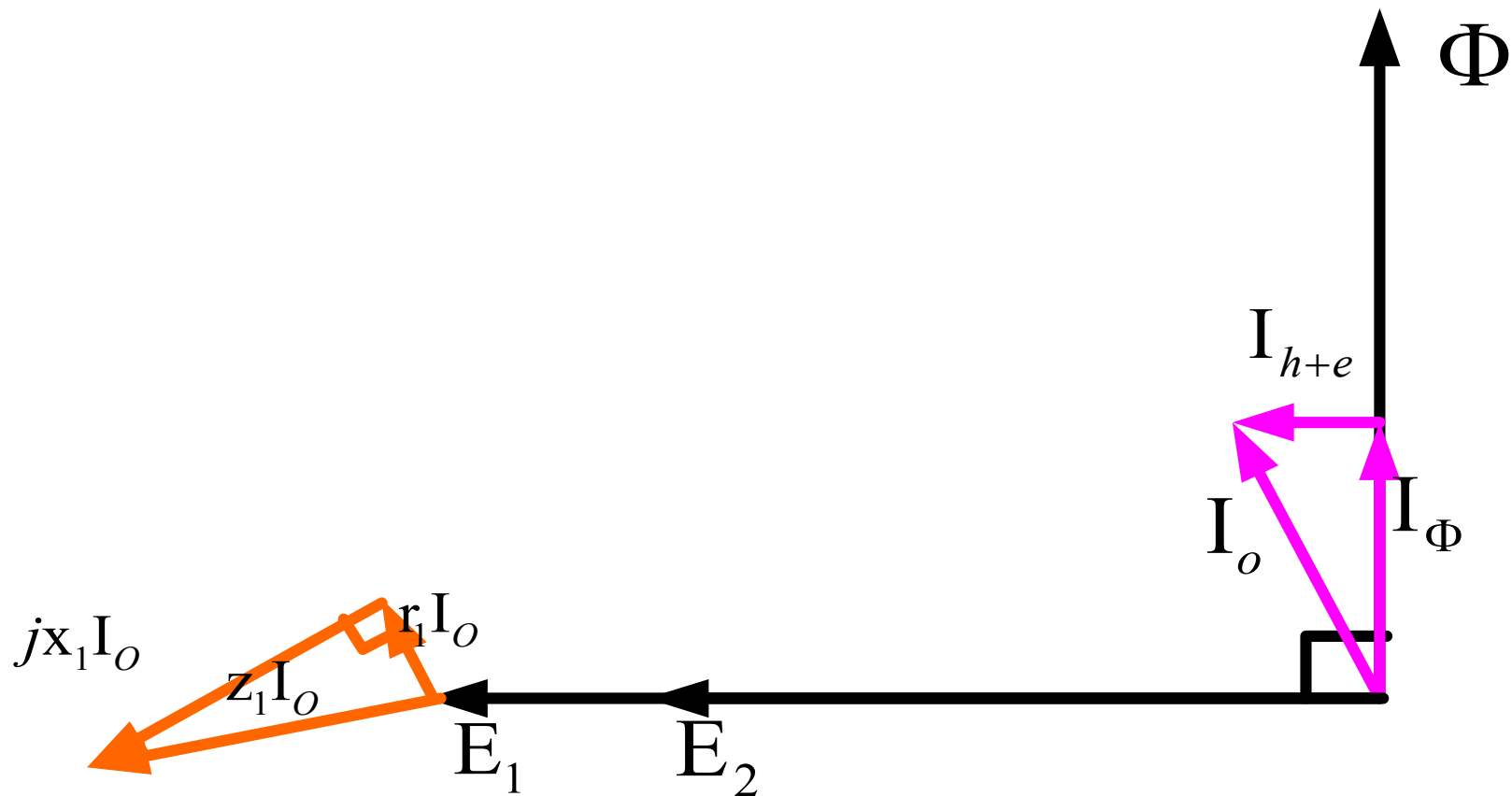
1차 유기기전력 E_1 과, 철손전류 I_{h+e} , 자화전류 I_ϕ 및 여자전류 I_o 의 관계를 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

무부하시 벡터선도 3

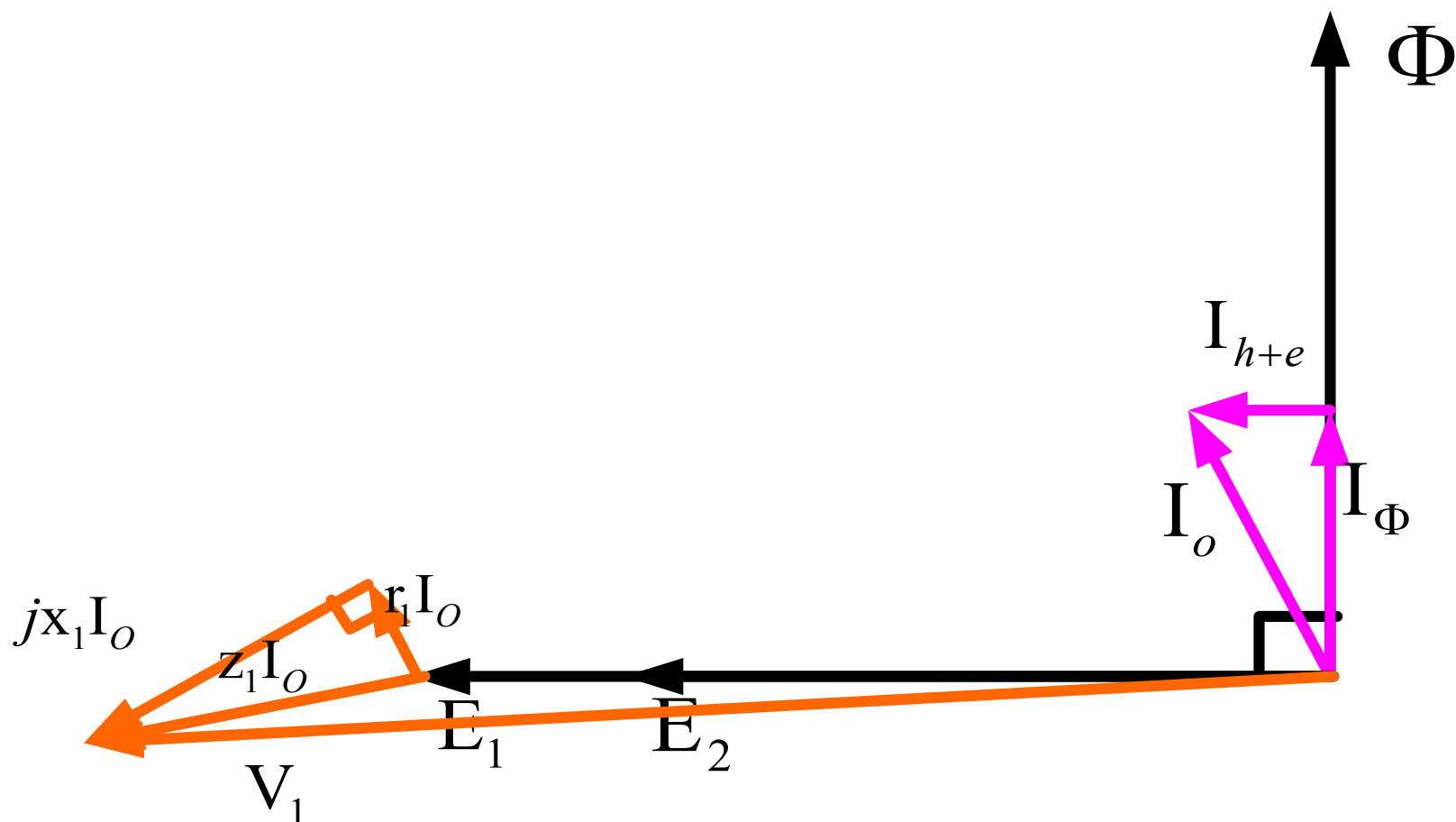
1차 누설임피던스의 전압강하 $z_1 \mathbf{I}_O$ 를 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

무부하시 벡터선도 4

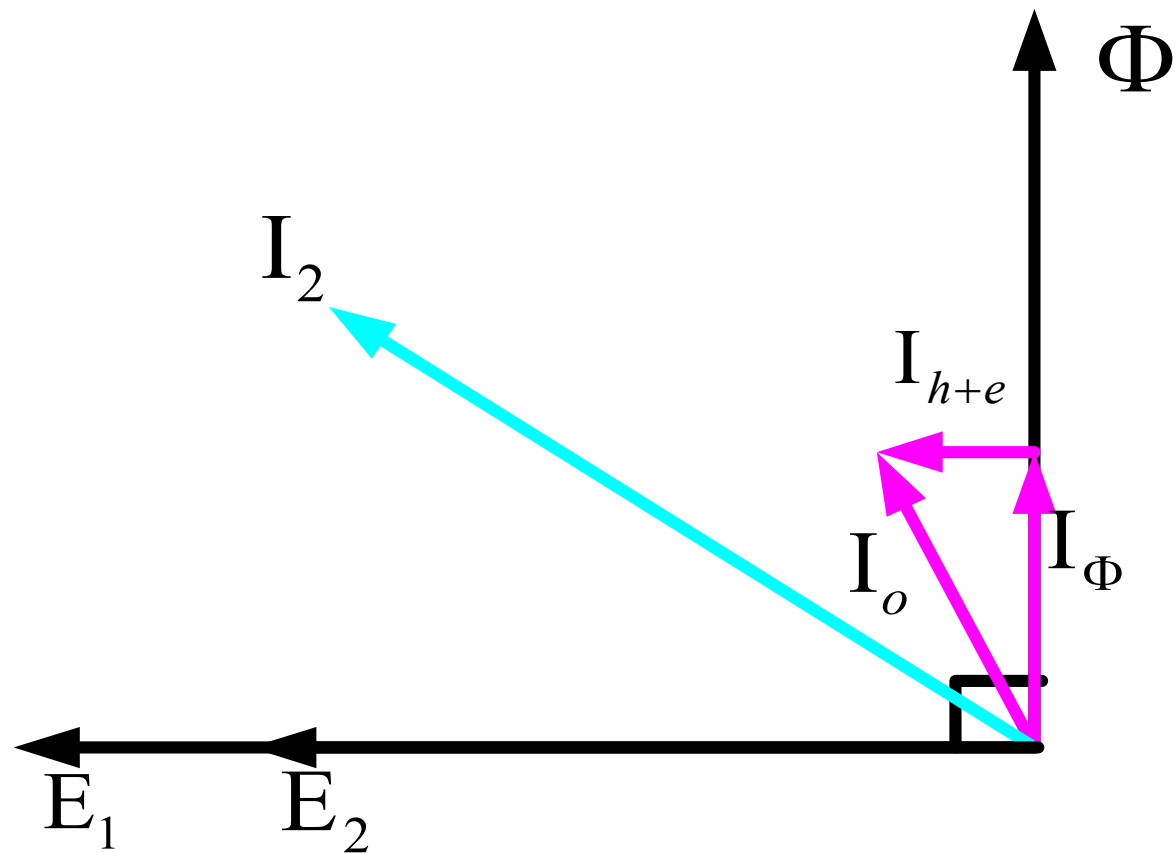
1차 누설임피던스의 전압강하 $z_1 I_o$ 에 의해 1차 공급전압 V_1 을 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

부하시 벡터선도 1

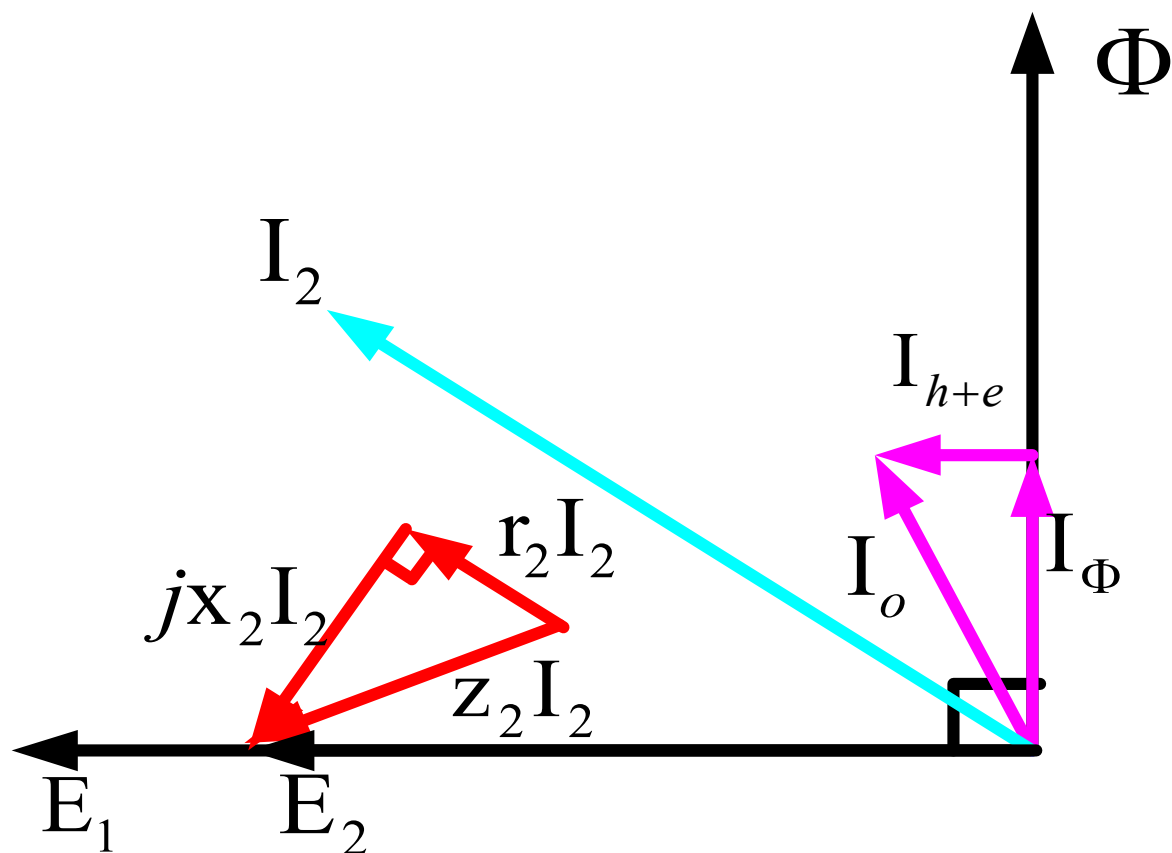
단자전압 V_2 에 비해 ϕ 만큼 뒤지는 부하전류 I_2 를 가정함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

부하시 벡터선도

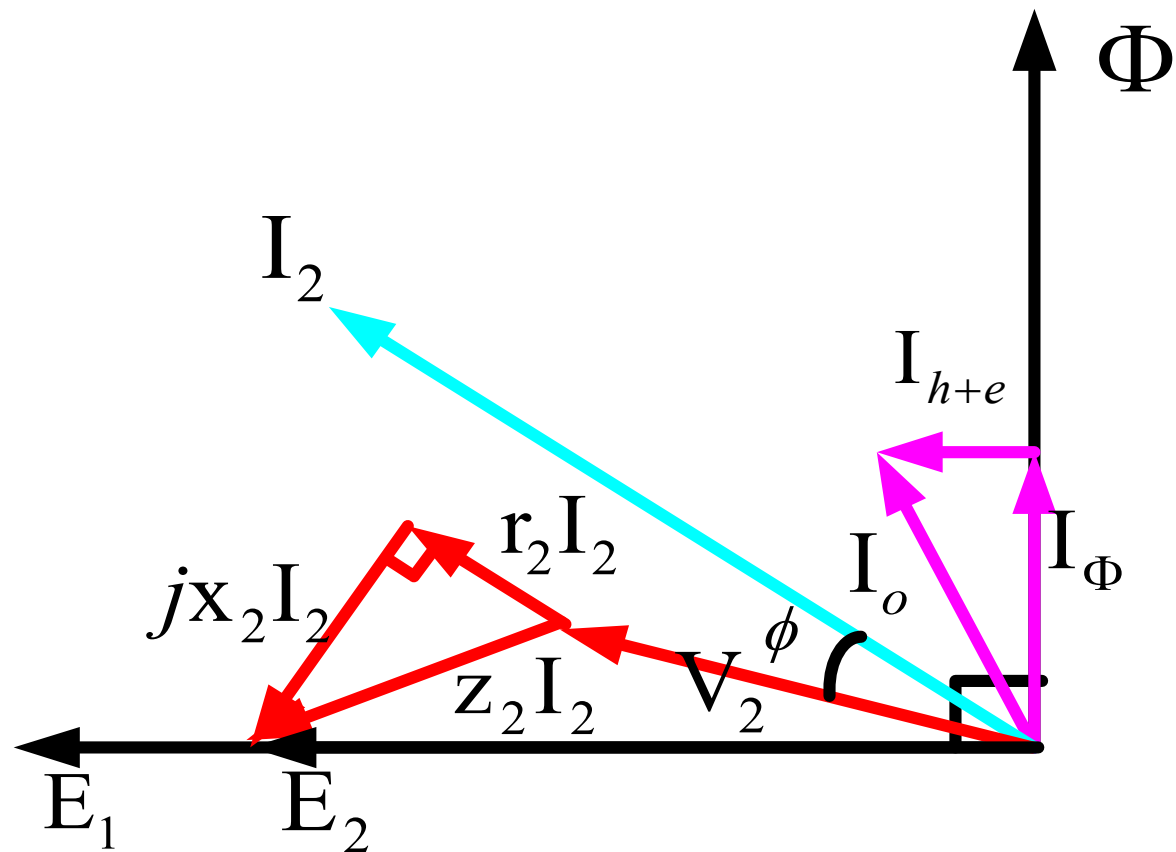
부하전류 I_2 에 의한 2차 누설임피던스 $z_2 = r_2 + jx_2$ 의 전압강하를 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

부하시 벡터선도

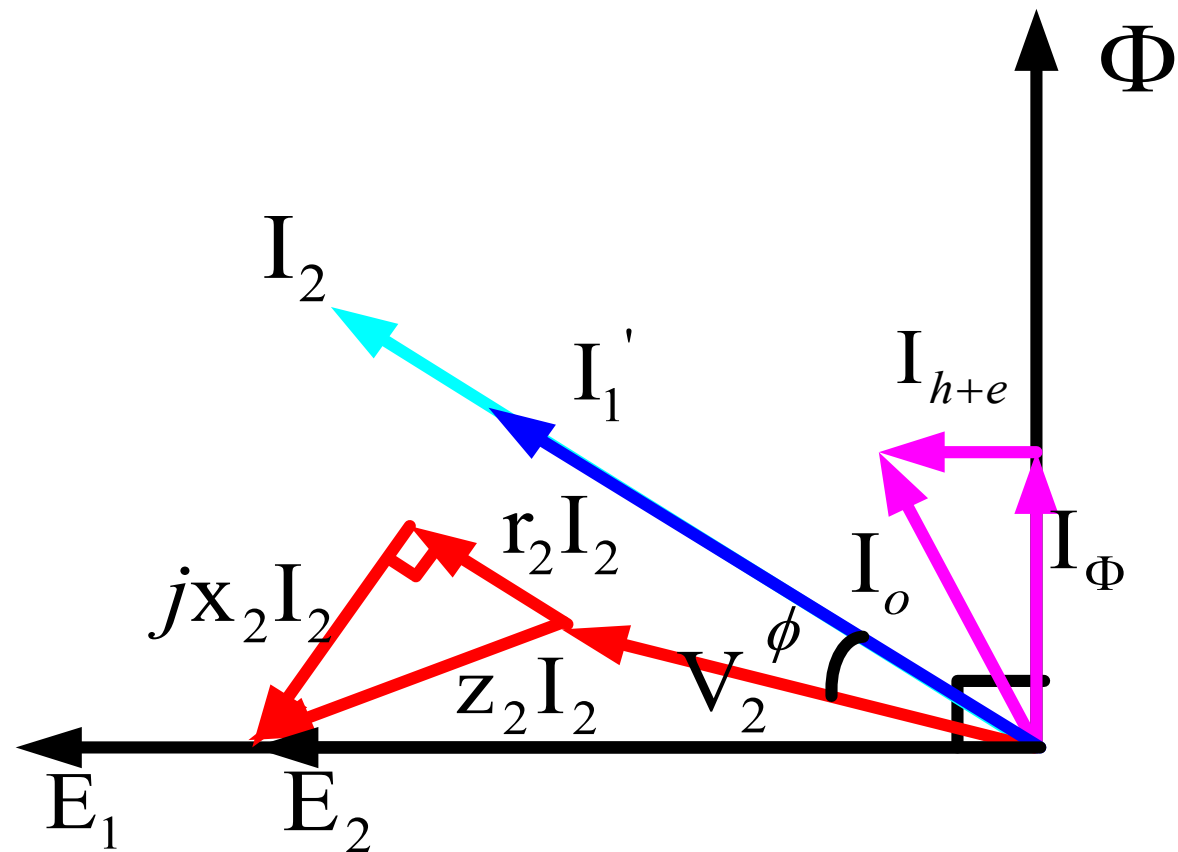
2차 누설임피던스의 전압강하 $z_2 I_2$ 에 의해 2차전압 V_2 을 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

부하시 벡터선도

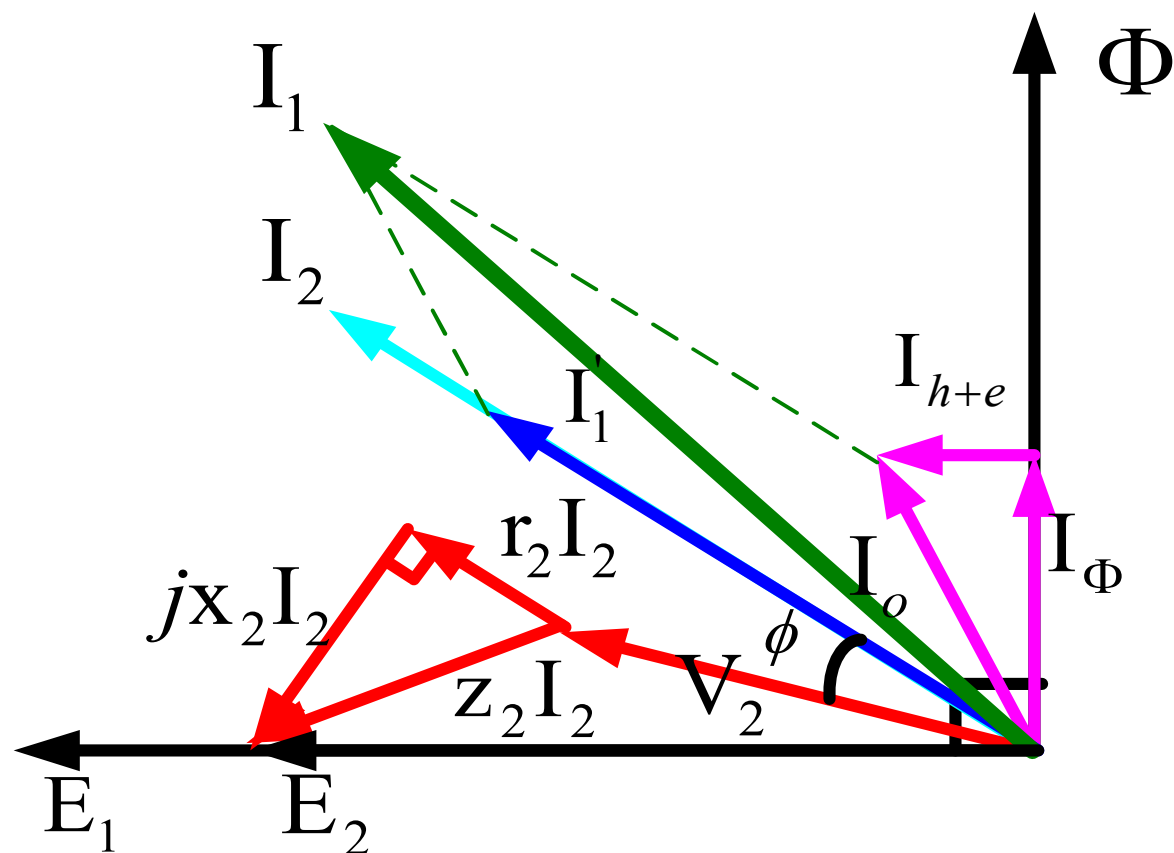
1차 부하전류 I_1' 를 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

부하시 벡터선도

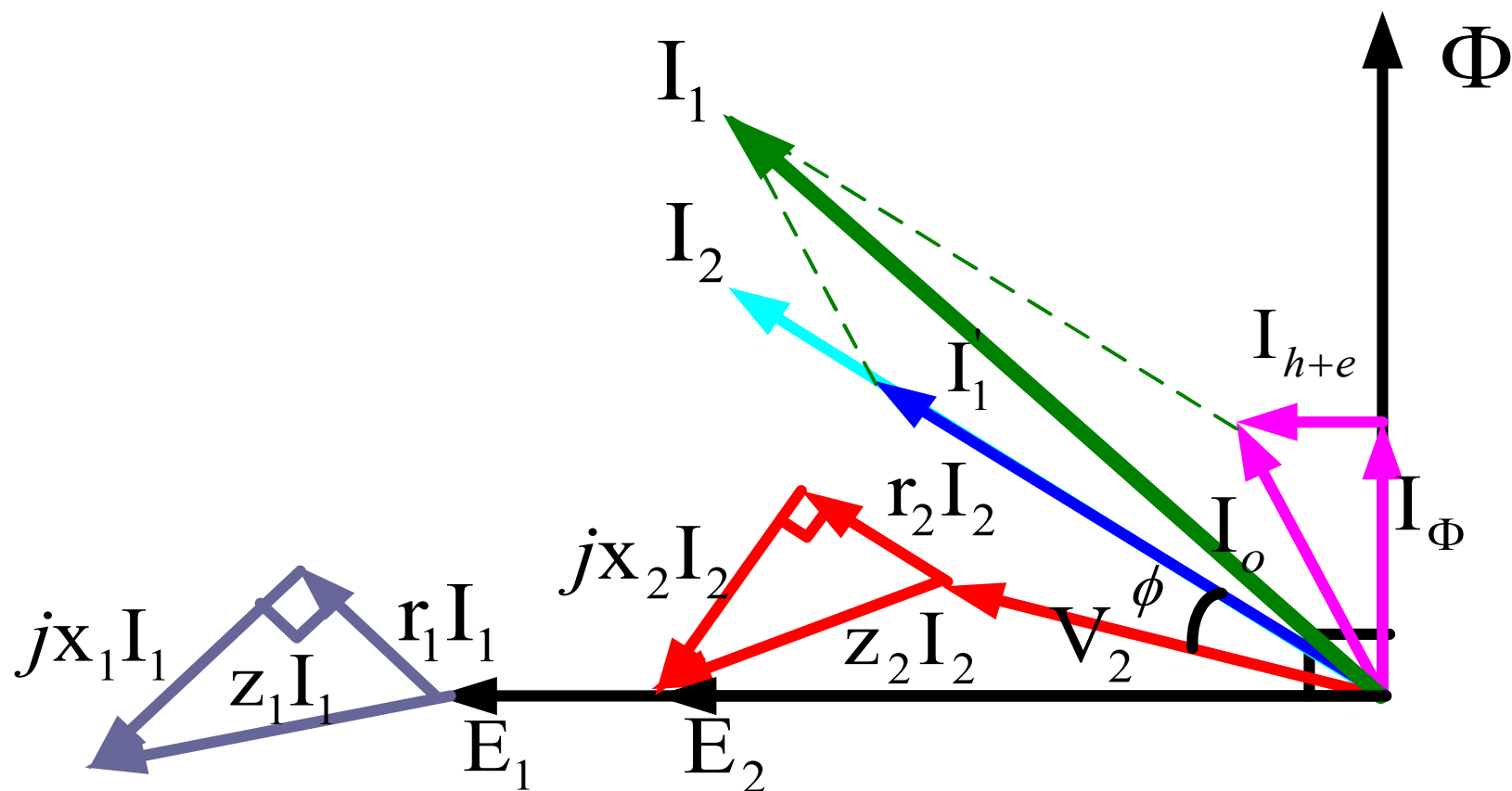
1차 부하전류 I_1' 와 여자전류 I_o 로써 1차 전류 I_1 를 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

부하시 벡터선도

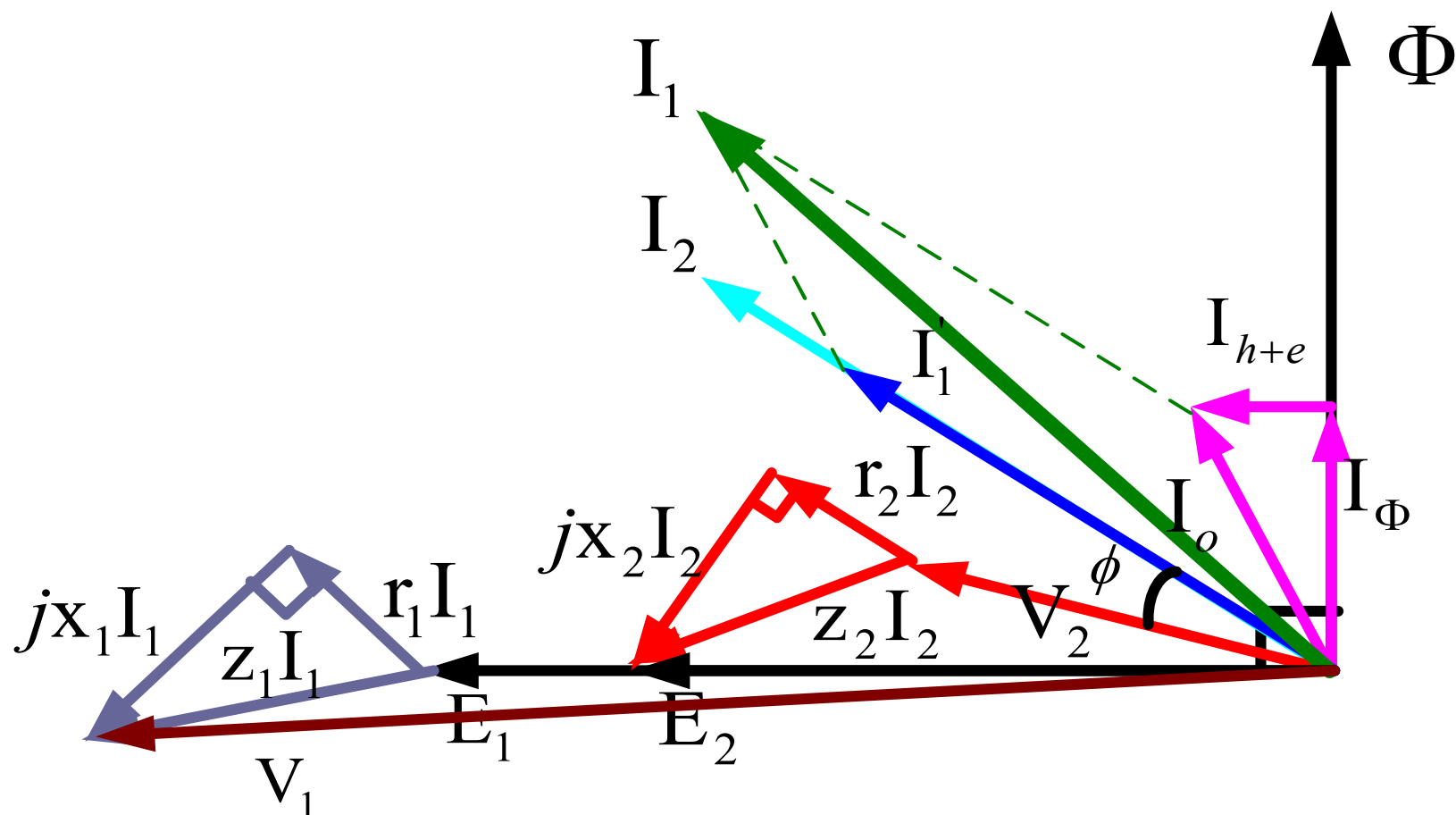
1차 누설임피던스의 전압강하 $z_1 I_1$ 를 구함



〈제2장〉 변압기의 벡터선도

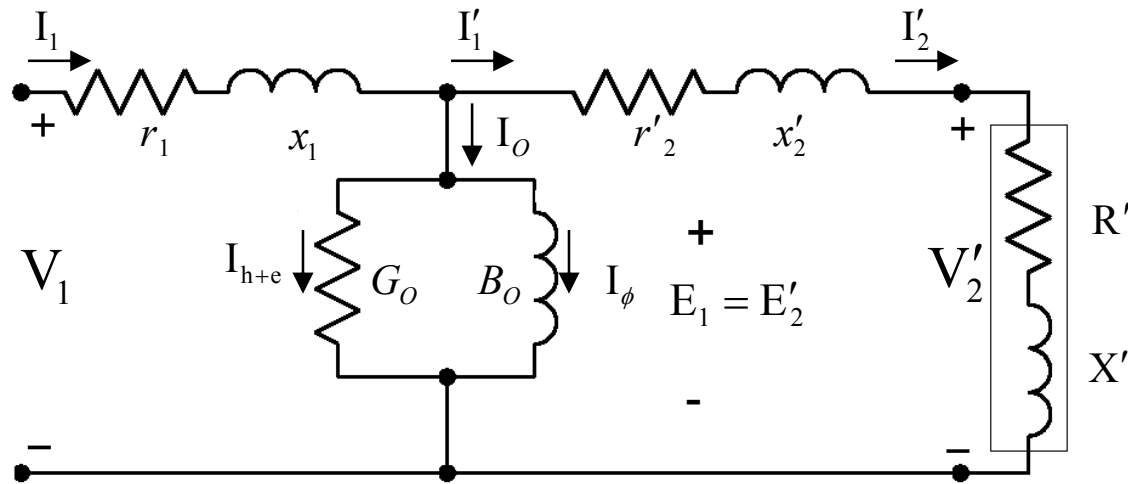
전체 벡터선도

1차 누설임피던스의 전압강하 $z_1 I_1$ 에 의해 1차 공급전압 V_1 을 구함



〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 근사등가회로

지금까지는 정확한 등가회로(exact equivalent circuit)에 대해 설명하였다.
계산상 편의를 위해 **근사등가회로**(approximate equivalent circuit)에 대해 살펴보자.



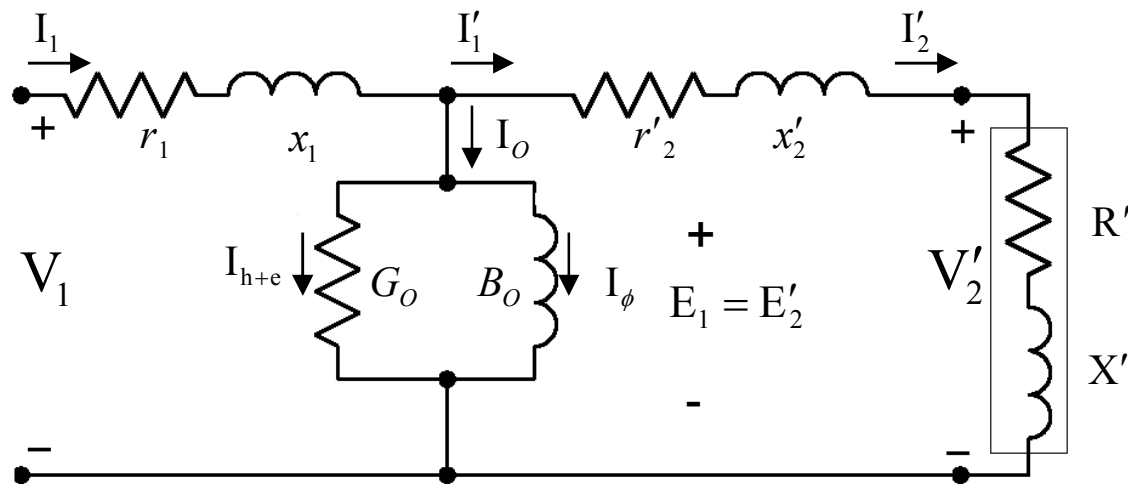
앞의 식(5)는 1차회로측에서의 전압방정식을 나타내고 있는데

$$V_1 = E_1 + z_1 I_1 = E_1 \left(1 + z_1 Y_o + \frac{z_1}{z'_2 + Z'} \right) \dots \dots \dots (5)$$

$z_1 Y_o$ 는 매우 작은 값(정격전압의 3~5% 정도) 이므로 이를 무시하고 다시 쓰면

$$V_1 \approx E_1 \left(1 + \frac{z_1}{z'_2 + Z'} \right) \dots \dots \dots (10)$$

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 근사등가회로



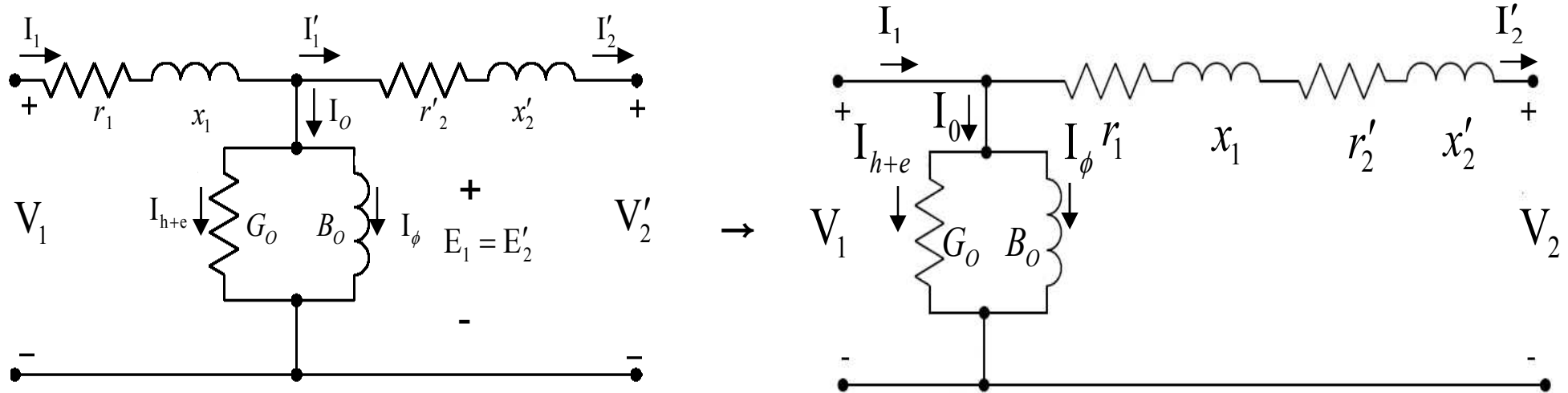
앞의 식을 다시 정리하면

$$V_1 \approx E_1 + \frac{Z_1}{z'_2 + Z'} E_1 \dots \dots \dots (11) \quad \leftarrow \quad I_1' = \frac{E_1}{z'_2 + Z'} \quad ; \text{1차부하전류}$$

$$\therefore V_1 \approx E_1 + z_1 I_1' \dots \dots \dots (12)$$

식(12)를 이용하여 다시 그리면 바로 근사등가회로가 얻어진다.

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 - 근사등가회로



앞의 식(12)를 사용하여

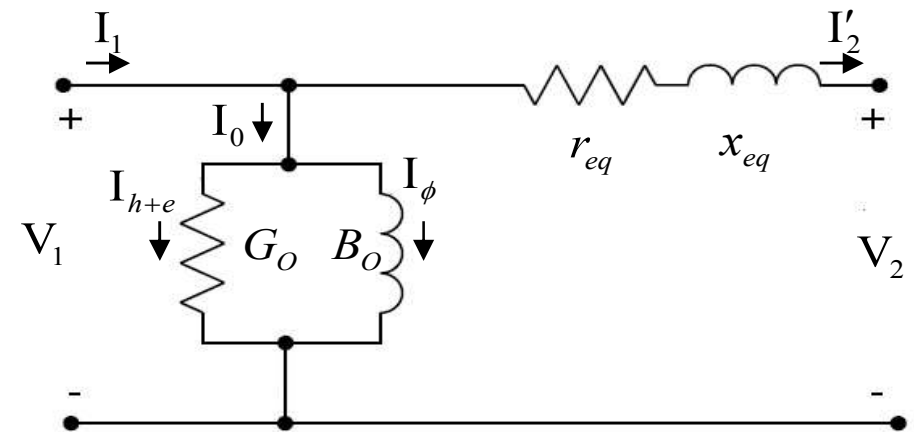
$$V_1 \approx E_1 + z_1 I_1' \dots \dots \dots (12)$$

회로를 그려보면 원하는 근사등가회로가 얻어진다. 1차 및 2차 합성 임피던스는

$$Z_{eq} = r_{eq} + jx_{eq} \dots \dots \dots (13)$$

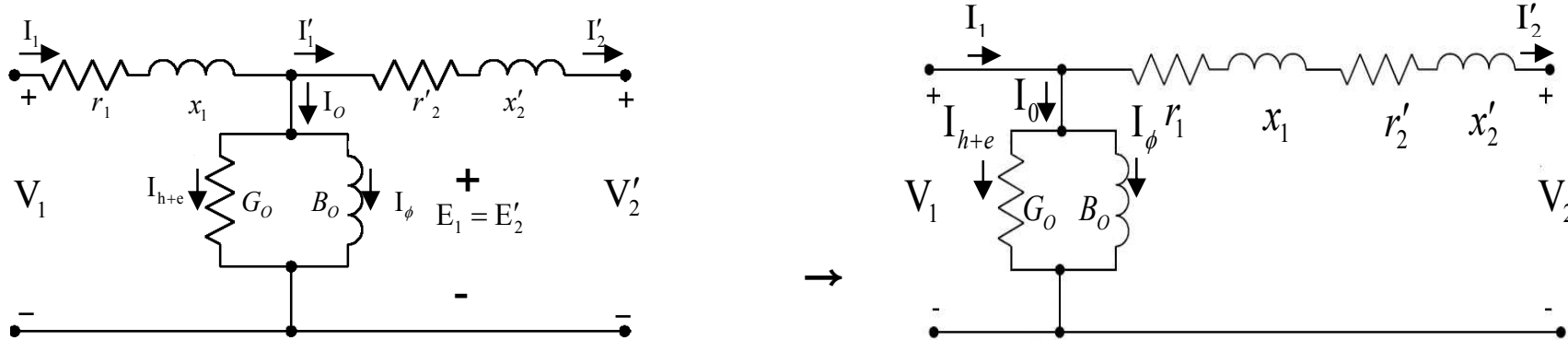
와 같이 얻어지고 합성 저항 및 합성 리액턴스는 다음과 같다

$$r_{eq} = r_1 + r_2' \quad x_{eq} = x_1 + x_2'$$



< 근사등가회로 >

〈제2장〉 2.5 변압기의 등가회로 – 등가회로와 근사등가회로 비교



<정확한 등가회로>

<근사 등가회로>

<주어진 값들>

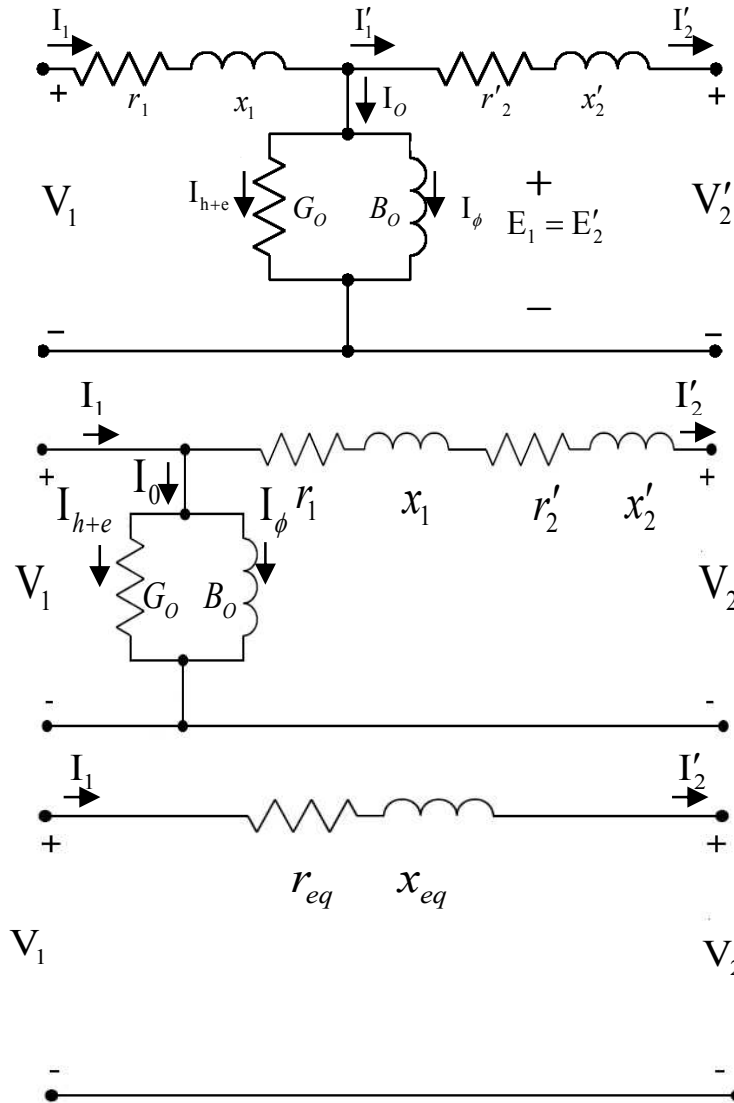
$$r_1 = 60, x_1 = 150, r'_2 = 0.06 \times 30^2, x'_2 = 0.18 \times 30^2$$

$$V_1 = 3150\text{V}, G_o = 55300, B_o = 50000, R' = 5 \times 30^2$$

	등가회로	근사등가회로
$Z_o = Y_o^{-1}$	$27510.56 + j24873.65$	$= 27510.56 + j24873.65$
I_1	0.744 A	0.749 A
I_o	0.083 A	0.084 A
I_2	0.67 A	0.68 A

<주의> 근사등가회로의 경우 거의 오차가 없음

<제2장> 2.5 변압기의 등가회로 - 등가회로 유형



<등가회로>

- 정확하지만 복잡한 회로 구성

<근사등가회로>

- 다소 부정확하지만 간단함
- 실용상 가장 많이 이용됨

<고주파용 등가회로>

- 고주파 동작시 사용하지만 60Hz 전력용 변압기에서는 거의 쓰지 않음

< 본 자료는 수업자료로써 책 Electric Machinery Fundamentals (4th – Stephen J. Chapman)의 그림이 이용되었음 >