

変圧器の基本

(読んでほしい人：電気系の高専生と大学生)

2007/11/18 舞鶴高専 平地克也

変圧器の「変圧」の原理

まず、変圧器がなぜ電圧を変圧できるのか、変圧器の基本原理を考えます。図1のようにコイルに磁束が鎖交している状態を想定します。この状態で磁束が変化するとコイルに電圧 v が発生します。 v と f の関係は次の式で表されます。これがファラデーの法則です。電磁誘導の法則とも言います。 N はコイルのターン数です。

$$v = N \frac{df}{dt} \quad \dots \dots \dots (1)$$

(1)式を積分すると(2)式が得られます。

$$f = \frac{1}{N} \int v dt \quad \dots \dots \dots (2)$$

(2)式は次のことを意味しています：コイルに電圧を印加すると磁束が発生する。磁束は電圧の積分値に比例する。

変圧器は図2に示すように1つの鉄心にコイルを2つ巻いたものです。2つのコイルのターン数をそれぞれ N_1 、 N_2 とします。ターン数 N_1 のコイル(以下 N_1 コイルと言う)に電圧 v_1 を印加すると(2)式に従って磁束が発生します。発生した磁束 f_m は次式で与えられます。

$$f_m = \frac{1}{N_1} \int v_1 dt \quad \dots \dots \dots (3)$$

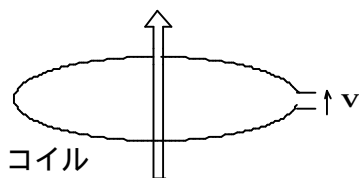


図1 ファラデーの法則

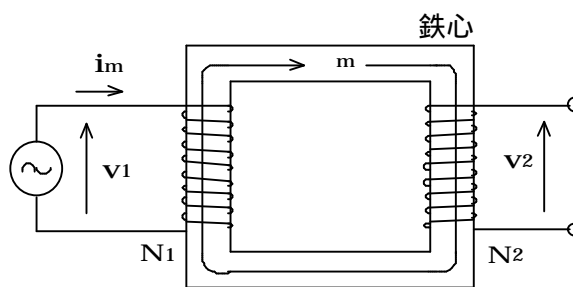


図2 変圧器の基本構成

鉄心は空気と比べて磁束を通しやすいので、図2に示すように、発生した磁束 f_m はほとんどが鉄心の中を通過して N_2 コイルに鎖交します。その結果、ファラデーの法則に従い、 N_2 コイルに次式で示される電圧 v_2 が発生します。

$$v_2 = N_2 \frac{df_m}{dt} \quad \dots \dots \dots (4)$$

(4)式に(3)式を代入して次の式を得ます。

$$v_2 = N_2 \frac{df_m}{dt} = N_2 \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{N_1} \int v_1 dt \right) = \frac{N_2}{N_1} v_1 \quad \dots \dots \dots (5)$$

この式から N₂ コイルには N₁ コイルとのターン数比に比例した電圧が発生することが分かります。よって、コイルのターン数を調整することにより、入力電圧 v₁ を「変圧」して、希望する出力電圧 v₂ を得ることができます。なお、入力側のコイル (N₁ コイル) を 1 次コイル、出力側のコイル (N₂ コイル) を 2 次コイルと言います。

負荷電流と励磁電流

図 2 において N₁ コイルに電圧 v₁ を印加すると、磁束 m の発生に伴って N₁ コイルに電流 i_m が流れます。この電流が磁束を励起していると考えられるので、「励磁電流」と言います。励磁電流と磁束の間には次の関係があります。

$$f_m = \frac{N_1 i_m}{R_m} \quad \dots \dots \dots (6)$$

N₁ × i_m を起磁力、R_m を磁気抵抗と言います。(6)式は電気回路のオームの法則に似ているので磁気回路のオームの法則と言います。鉄の磁気抵抗は大変小さいので、小さな励磁電流で大きな磁束を発生させることができます。

次に、図 3 に示すように、2 次コイル N₂ に負荷抵抗 R_L を接続した状態を考えます。N₂ コイルには次式に示すように、電気回路のオームの法則に従って負荷電流 i₂ が流れます。

$$i_2 = \frac{v_2}{R_L} \quad \dots \dots \dots (7)$$

N₂ コイルに電流 i₂ が流れると磁気回路のオームの法則に従って(8)式で示される磁束 m_(i₂)が発生しようとしませんが、(9)式に示すように、1 次コイルにその磁束をちょうど打ち消す大きさの電流 i_{1L} が流れます (図 3 参照)。その結果、負荷電流が流れても鉄心の磁束の大きさは変わらず、ファラデーの法則から導かれる(3)式の m から変化することはありません。

$$f_{m(i_2)} = \frac{N_2 i_2}{R_m} \quad \dots \dots \dots (8)$$

$$f_{m(i_{1L})} = \frac{N_1 i_{1L}}{R_m} \quad \dots \dots \dots (9)$$

m_(i₂) と m_(i_{1L}) は同じ大きさなので次式が成立し、i₂ と i_{1L} の大きさはコイルのターン数に反比例することが分かります。

$$\frac{N_2 i_2}{R_m} = \frac{N_1 i_{1L}}{R_m} \quad \text{よって、} \quad i_{1L} = \frac{N_2}{N_1} i_2 \quad \dots \dots \dots (10)$$

以上のように、変圧器には次の 3 種類の電流が流れています。

- i_m : 励磁電流
- i₂ : 2 次側の負荷電流
- i_{1L} : 1 次側の負荷電流

前記のように、2 次側の負荷電流 i₂ と 1 次側の負荷電流 i_{1L} の作る磁束はお互いに打ち消し合い、励

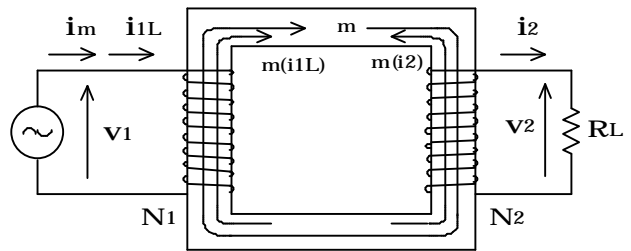


図 3 変圧器と負荷電流

励磁電流 i_m のみが磁束を作ります。1 次コイルには i_m と i_{1L} の双方が流れるので、1 次コイルの電流を i_1 と置けば次の関係があります。

$$i_1 = i_m + i_{1L} \quad \dots \dots \dots (11)$$

また、前記のように鉄心は磁気抵抗が小さいので励磁電流 i_m は小さく、通常は負荷電流 i_{1L} と比較すれば無視できる程度のわずかな値となります。

負荷電流と漏れ磁束

前記のように、鉄心の磁気抵抗は空気の磁気抵抗より非常に小さいので磁束は大部分が鉄心の中を通過して 2 次コイルと鎖交します (図 2 参照)。しかし、鉄心の磁気抵抗はゼロではないので、図 4 に示すように、一部の磁束 ϕ_1 は空気の中に漏洩し、2 次コイルと鎖交しません。これを漏れ磁束 (または漏洩磁束) と言います。また、前記のように、2 次側に負荷抵抗 R_L が接続されて負荷電流 i_2 が流れた場合はこの電流が磁束 $\phi_{m(i_2)}$ を作ろうとしますが、1 次コイルの電流 i_{1L} の作る磁束で打ち消されて結局負荷電流は磁束をつくりません。しかしながら、 i_{1L} で打ち消されるのは鉄心の中の磁束だけであり、 i_2 が作る磁束のうち空気の中に漏洩したものは i_{1L} で打ち消されることはありません。よって、2 次側の負荷電流 i_2 は図 5 に示すように 2 次側の漏れ磁束 ϕ_{l2} を作ります。同様に 1 次側の負荷電流 i_{1L} も励磁電流 i_m と一緒に 1 次側の漏れ磁束 ϕ_{l1} を作ります。通常は $i_{1L} \gg i_m$ なので、 ϕ_{l1} の大部分は 1 次側の負荷電流 i_{1L} が作ることとなります。よって、次のように言うことができます：鉄心の磁束は励磁電流が作り、漏れ磁束は負荷電流が作る。

なお、変圧器の等価回路は図 6 に示すように励磁インダクタンスには励磁電流 i_m のみが流れ、漏れインダクタンス (l_1, l_2') には負荷電流が流れるように作られています。これは鉄心の磁束は励磁電流が作り、漏れ磁束は負荷電流が作る、ということに対応しています。

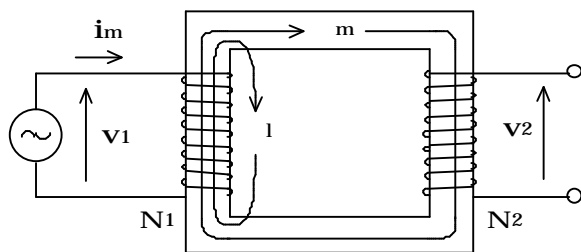


図 4 漏れ磁束

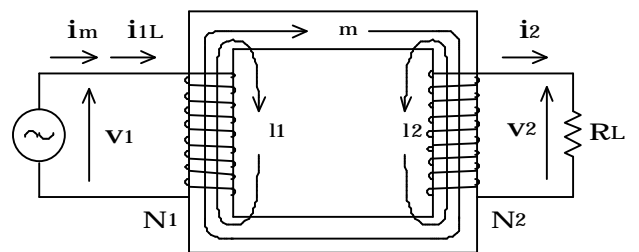


図 5 負荷電流と漏れ磁束

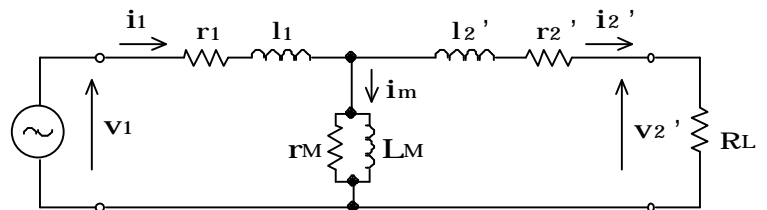


図 6 変圧器の等価回路

以上