

変圧器の漏れ磁束と漏れインダクタンス

(読んでほしい人：パワエレ初心者)

2014/10/4 舞鶴高専 平地克也

変圧器の漏れインダクタンスは通常は変圧器の動作の障害となるので極力小さくなるように設計します。しかし DC/DC コンバータでは、漏れインダクタンスを利用してソフトスイッチングを実現する、リアクトルと変圧器を一体化する、など積極的に漏れインダクタンスを利用する回路方式が増えています。しかし、漏れインダクタンスは計算で求めることは容易ではなく、決まった作り方もなく、分かり易い解説書もないようであり、間違っ理解している人も多いようです。本技術メモでは漏れ磁束と漏れインダクタンスに対する正しい考え方を説明します。

漏れ磁束と漏れインダクタンスの関係

図 1 に変圧器の電圧、電流、磁束を示します。1 次巻線に電圧 v_1 を印加すると励磁電流 i_m が流れ鉄心に磁束 m を作ります。 m は 2 次巻線に鎖交し、電磁誘導により 2 次電圧 v_2 を発生させ、負荷電流 i_2 が流れます。 i_2 に対応して 1 次側にも負荷電流 i_1 が流れます。 i_m が主磁束 m を作り、1 次巻線電流 $i_1 + i_m$ が漏れ磁束 l_1 を作り、2 次巻線電流 i_2 が漏れ磁束 l_2 を作ります。 i_1 と i_2 は鉄心には磁束を作りません。詳細は平地研究室技術メモ No.20071118「変圧器の基本」を参照下さい。磁束 l は電流 i に比例し、その比例係数がインダクタンス L です。式で表すと、

$$l = Li$$

よって、

$$m = L_m i_m \quad (L_m \text{ は励磁インダクタンス})$$

$$l_1 = L_{l1} (i_1 + i_m) \quad (L_{l1} \text{ は 1 次巻線の漏れインダクタンス})$$

$$l_2 = L_{l2} i_2 \quad (L_{l2} \text{ は 2 次巻線の漏れインダクタンス})$$

図 2 は電気機器の教科書で勉強する変圧器の等価回路です。 L_{l1} は 1 次巻線電流 $i_1 + i_m$ が作り、 L_{l2} は 2 次巻線電流 i_2 が作るので L_{l1} と L_{l2} はそれぞれ $i_1 + i_m$ と i_2 が流れるように配置されています。 i_1 と i_2 は m は作らないので L_m には i_1 と i_2 は流れません。なお、図 2 の r_1 と r_2 は巻線抵抗、 r_m は鉄損抵抗ですが、今回は無視して下さい。

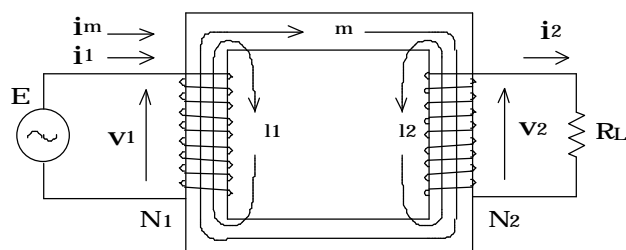


図 1 変圧器の電圧、電流、磁束

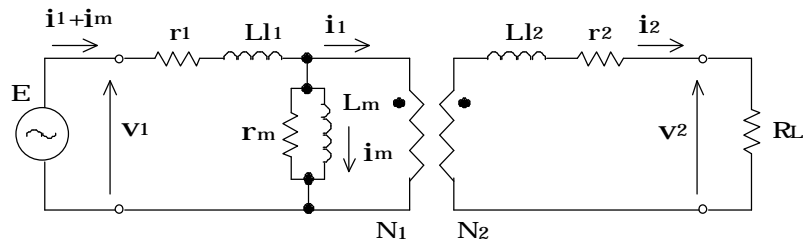


図2 変圧器の等価回路

漏れインダクタンスに関するよくある誤解

上記のように、漏れ磁束により漏れインダクタンスが発生することは良く知られた変圧器の常識です。一方、変圧器の鉄心にギャップを設けると漏れ磁束が増加することも良く知られています。そこで、両者を結びつけてギャップを設けると漏れインダクタンスが増加すると考えてしまいがちですが、それは間違いです。

図3はEIコアにギャップを設けた時の磁束分布のシミュレーション結果ですが、確かにギャップの部分からたくさんの磁束が空間に漏れています。図4にEIコアの通常の巻線方法を示します。1次巻線と2次巻線は中脚に重ねて巻かれます。図4の巻線方法では図3のように大きな漏れ磁束が発生しても漏れインダクタンスは発生しません。理由は以下の通りです。

再度図1を見て下さい。主磁束 m は1次巻線2次巻線双方に鎖交しているので相互誘導を引き起こし変圧器の動作を実現します。1次巻線の漏れ磁束 l_1 は磁束が鉄心から漏れた結果2次巻線には鎖交せず、その結果相互誘導は引き起こさず、1次巻線自身の自己誘導のみ引き起こします。自己誘導の結果生じた自己インダクタンスが図2の L_{l1} であり、これを漏れインダクタンスと呼んでいます。同様にして2次巻線の漏れ磁束 l_2 は2次巻線にのみ鎖交しているため2次巻線の自己誘導を引き起こし自己インダクタンス L_{l2} を作ります。このように、漏れ磁束は片方の巻線にのみ鎖交している

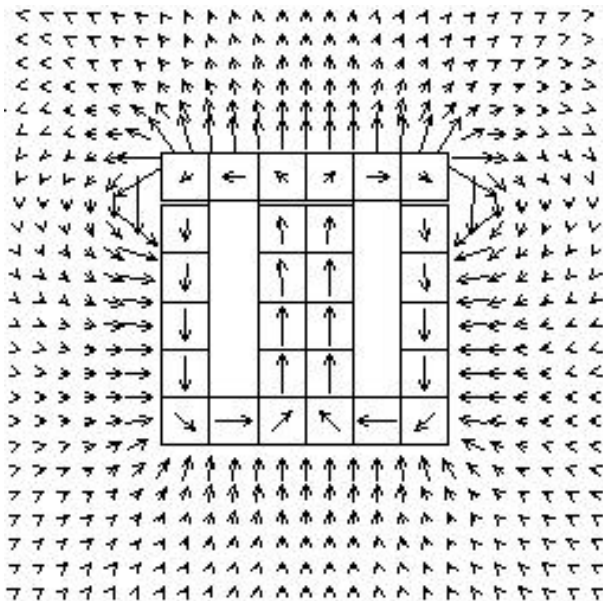


図3 EIコアのギャップによる漏れ磁束

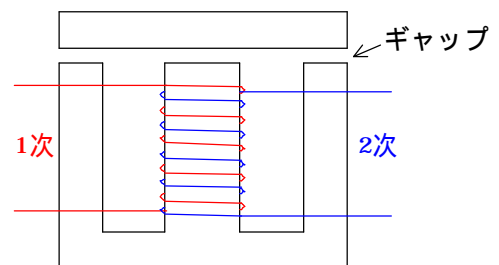


図4 EIコアの通常の巻線方法

のでその結果自己誘導により自己インダクタンス L_{11} と L_{22} を作り、これを漏れインダクタンスと呼んでいます。

一方、図3に示したギャップ部分の漏れ磁束は中脚部分を起点として流れており、中脚部分で1次巻線2次巻線の双方に鎖交しています。よってこの磁束は相互誘導を引き起こしている主磁束 m の一部です。よって、この磁束は自己インダクタンス(即ち漏れインダクタンス)は作りません。漏れインダクタンスは確かに漏れ磁束により発生しますが、全ての漏れ磁束が漏れインダクタンスを発生させるわけではないのです。1次巻線、2次巻線の片方にのみ鎖交する磁束が漏れインダクタンスを作ります。

漏れインダクタンスを作るための巻線方法

漏れインダクタンスを作るためには片方の巻線だけに鎖交する磁束を作る必要があります。そのためには1次巻線と2次巻線を物理的に分離する必要があります。図5にEIコアで1次巻線と2次巻線を分離した巻線方法を示します。この巻線方法なら図5の点線のように1次巻線にのみ鎖交する磁束 l_1 と2次巻線にのみ鎖交する磁束 l_2 が存在するので漏れインダクタンスが生じます。わざと漏れインダクタンスを大きくするために図5のように1次と2次を分離して巻いた変圧器も市販されています(例えば図6)。私は昔図7のような形状の変圧器を作ったことがあります。このように構造にすると図5の l_1 と l_2 が増加し、大きな漏れインダクタンスを得ることができます。ギャップの長さを変えらることによりパスコア部分の磁気抵抗を変化させて漏れ磁束の大きさを制御し、漏れインダクタンスを調整します。

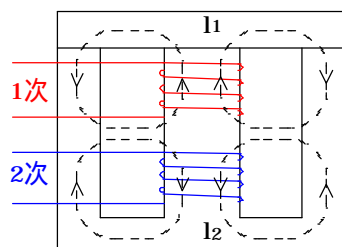


図5 漏れ磁束の多い巻線方法



(TDKのカタログより)

図6 TDKのSRXシリーズ

UUコアなどを使って図1のように左右の脚に巻線しても図5と同様に漏れインダクタンスが大きくなります。図8のようにEIコアの中脚を削って左右の脚に巻線すると図7と同様に大きな漏れインダクタンスが得られます。

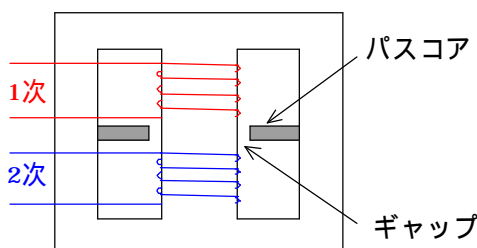


図7 パスコア付き変圧器

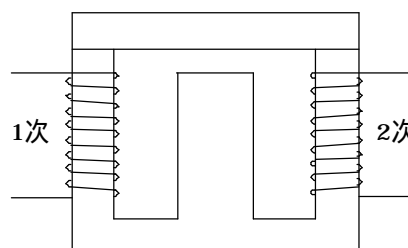


図8 EIコアの左右の脚に巻線

以上