

学術論文

磁心損失を考慮した磁気パルス圧縮回路の解析

Analysis of Magnetic Pulse Compression Circuit taking into account Core Loss

岩原 正吉 (金沢大学)
杉本 博昭 (金沢大学)

山田 外史 (金沢大学)
小嶋 利幸 (金沢大学)

Masayoshi IWAHARA, Member of JSAEM, Kanazawa University,
Kodatsuno, Kanazawa 920

Sotoshi YAMADA, Member of JSAEM, Kanazawa University

Hiroaki SUGIMOTO, Kanazawa University

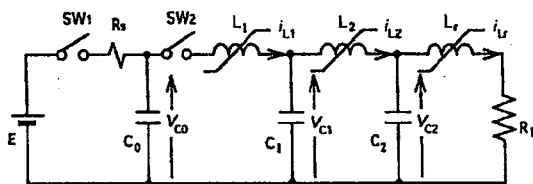
Toshiyuki KOJIMA, Kanazawa University

This paper presents the numerical analysis of magnetic pulse compression circuit taking into account eddy current loss of core. In order to be clear the loss contribution to the circuit performance, the magnetic nonlinearity and eddy current effect of core has been considered in the analysis, and the analysis was performed numerically by use of tableau method. On the view of 1) energy transfer efficiency, 2) current gain and 3) pulse compression ratio, the circuit performance has been investigated on the initial voltage of the start-up condenser and the setup time of core flux.

Key Words : Magnetic switch, eddy current loss, Tableau Method

1 まえがき

近年、各種レーザー等の電源装置として、強磁性体の強度の非線形性を回路スイッチ（不飽和時：OFF，飽和時：ON）として用いた磁気パルス圧縮回路の実用化が進んでいる [1]。磁気パルス圧縮回路は基本的には C-L-C の共振回路であり、耐久性および信頼性に優れ、高繰り返し動作に適している。しかし、磁気パルス圧縮回路ではこれまで期待された性能が得られていない。磁心損失がその主たる原因で、システムの高速度および大容量化の障害となっている。本研究では、これまで磁気パルス圧縮回路に関して、磁気素子内に発生するうず電流の影響を考慮したタブロー法による解析手法 [2] を提案し、その解析法の有効性について



$$C_0=115.4\mu\text{F}, C_1=115.5\mu\text{F}, C_2=116.5\mu\text{F}, R_L=0.171\Omega$$

Fig.1 Magnetic pulse compression circuit

モデル装置を試作し実験により明らかにした。本稿では、回路動作の解明を主眼として磁気パルス圧縮回路に関して初期電圧および磁心の未飽和区間を回路パラメータとして、磁心損失を考慮した回路解析を行った。

2 システム構成

磁気パルス圧縮回路は多段構成にすることによって圧縮比を高め、大出力化を可能とする。しかし、効率および電流利得の低下から、多くは1段のみを利用している [1], [3]。本研究では、多段回路の基本となる Fig.1 に示す 2 段式磁気パルス圧縮回路を解析対象として取り上げる。回路は、受動素子であるキャパシタ

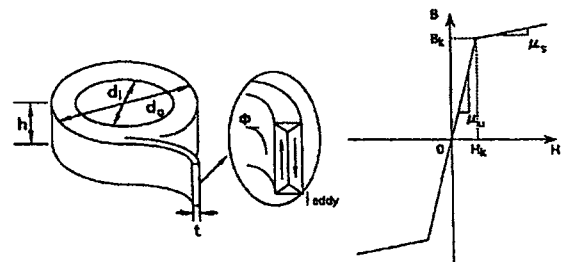


Fig.2 Core geometry and B-H curve of core

と可飽和リアクトルのみで構成される。可飽和リアクトルの磁心形状は Fig.2 に示す $D_i = 25.0\text{mm}$, $D_o = 35.0\text{mm}$, $h = 10.0\text{mm}$, 板厚 $t = 0.1\text{mm}$ の環状磁心である。磁心の磁性材料にはセンデルタを用いた。センデルタは飽和磁束密度 $B_S = 1.57\text{T}$, 保持力 $H_C = 12.5\text{A/m}$ の磁気特性を有し, 導電率 σ は $2.2 \times 10^6\text{S/m}$ である。解析にあたって以下の仮定をする。
 1) 磁心の磁化特性は Fig.2 に示す 2 折れ線近似特性と仮定する。2) 磁心損失としてうず電流損のみを考慮する。ただし, うず電流は伝導電流のみを考慮し, うず電流の拡散および表皮効果は無視する。3) 磁心の漏れ磁束は無視する。

3 解析方法

本稿では磁心の解析モデルとして Fig.3(a), (b) に示すような電気回路, 磁気回路, うず電流回路からなる磁心等価回路を考える。Fig.3(a) は, うず電流の効果を考慮しない磁心等価回路を, Fig.3(b) は, うず電流の効果を考慮した磁心の等価回路を示す。図中の e, e_d は誘起電圧, u は起磁力, R_m はリラクタンス, R_{ed} はうず電流抵抗, r は巻線抵抗を示す。この磁心等価回路を用いて Fig.4 に示す磁気パルス圧縮回路の等価回路を構成する。その等価回路についてタブロー方程式を導出し [4], タブロー法により回路解析を行った。

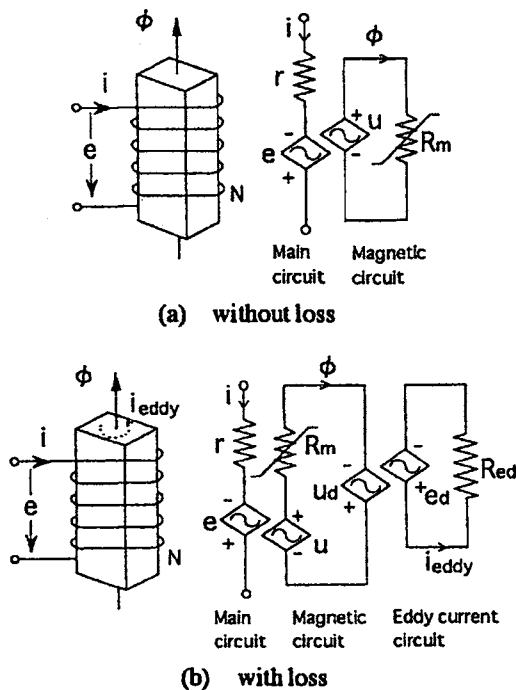


Fig.3 Equivalent circuit of core

磁気パルス圧縮回路の動作性能については前報 [2] で定義した各段のエネルギー転送効率 η , 各段電流の最大値比である電流利得 G_i , 各段のパルス幅圧縮率とで評価する。さらに, 初期エネルギーに対して損失が占める割合を損失比 γ とし, $P/(C_0V_{C0}^2/2) \times 100\%$ と定義する。ただし, V_{C0} はキャパシタ C_0 に充電する初期電圧, P はリアクトルに生じる損失とし, Fig.5 に示すようにリアクトルの端子電圧と電流との積から求める。この指標を用いて初期エネルギーに対してどれくらいの損失がリアクトルに生じているかを検討する。
 Fig.6 は, 回路解析より得た磁心内に生じる誘起電圧, うず電流, うず電流損の計算波形の例である。う

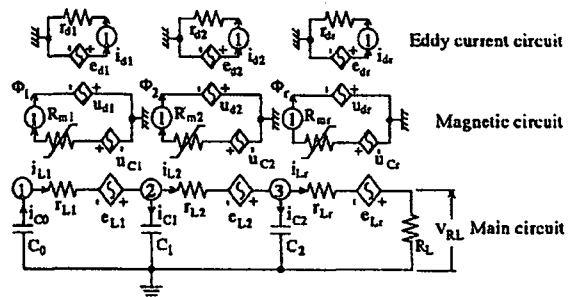


Fig.4 Equivalent circuit of the MPC

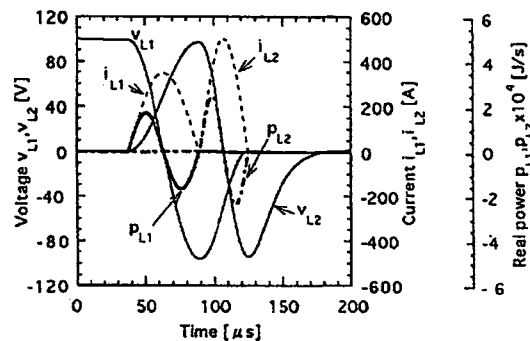


Fig.5 An example of simulation results in reactors

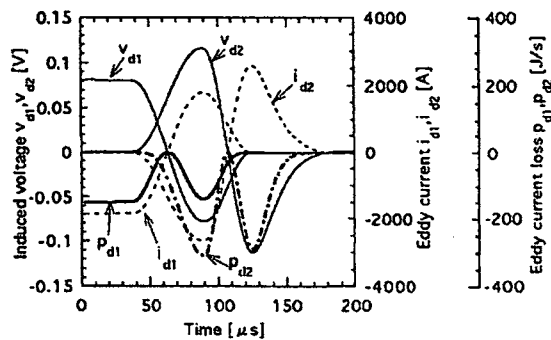


Fig.6 An example of simulation results in eddy current circuit

ず電流損は、磁心内部に $d\phi/dt$ による誘起電圧が発生することによって生じる。未飽和領域において磁心がリセット値から飽和点に至るまでの区間を未飽和区間とすると、未飽和区間は時間変化分 dt として磁心損失の大きさに関係する。そこで、回路パラメータとして、この未飽和区間と初期電圧に注目し解析を行なう。また、実際にモデル装置の試作を行ない、実験も行った。

4 解析結果

Fig.7 に各段のリアクトルの値を $L_1 = 2L_2 = 4L_R$, $L_{1S} = 4.6\mu H$, $L_{1u} = 46.0\mu H$ とし、初期電圧を $V_{C0} = 20V$ とした場合の回路各部の計算波形および実測波形を示す。ただし、 L_{1S} は磁心の飽和時のインダクタンス、 L_{1u} は磁心の未飽和時のインダクタンスである。Fig.7 の計算波形に関して、有損失のリアクトル L_2 に流れる電流 i_{L2} のピーク値 I_{L2max} が、無損失に比べて 0.87 倍に減少しており、磁心損失が圧縮動作に影響を与えていることが分かる。また、実測の I_{L2max} が計算値の I_{L2max} に比べて 0.67 倍に減少しているのは、うず電流損以外の損失の影響によるものだと考えられる。

4.1 初期電圧依存性

初期電圧 V_{C0} を 0~150V の範囲に設定し、 V_{C0} を変化させ、解析を行った。Fig.8 にエネルギー転送効率と損失比の初期電圧依存性を、Fig.9 に電流利得とパルス幅圧縮率の初期電圧依存性を示す。Fig.8 より、有損失の効率は、110V 付近でピーク値をもつことが分かる。損失比が大きい電圧域では、効率低下および

電流利得低下が見られ、損失比が小さい電圧域では、磁心損失による効率低下および電流利得低下は見られない。無損失の結果と比較した場合でも 20V で 17%、110V で 5% の効率低下が見られ、電流利得に関しても 20V で 0.10、110V で 0.02 の低下が見られる。ただし、 $V_{C0} = 110V$ 以上で損失の有無にかかわらず効率が低下しているのは、キャパシタ C_1 の充電時に可飽和リアクトル L_2 が飽和してしまい、充電電流が次段に漏れているからである。パルス幅圧縮率は無損失での計算値と等しく、磁心損失の影響は見られない。Fig.10 に効率の最大となる $V_{C0} = 110V$ の時の計算波形を示す。Fig.10 を見ると電流パルスが連続して生じており、後段へのエネルギー転送がうまく行われている。

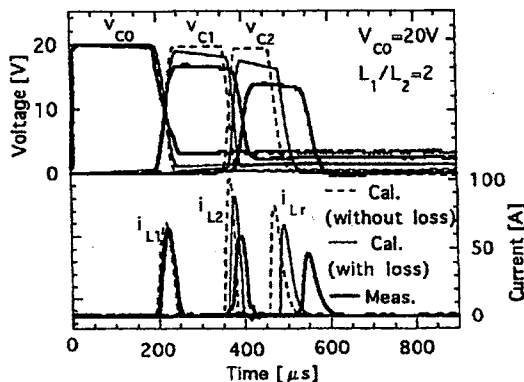


Fig.7 Comparison between calculated waveforms and measured waveforms ($V_{C0} = 20V$)

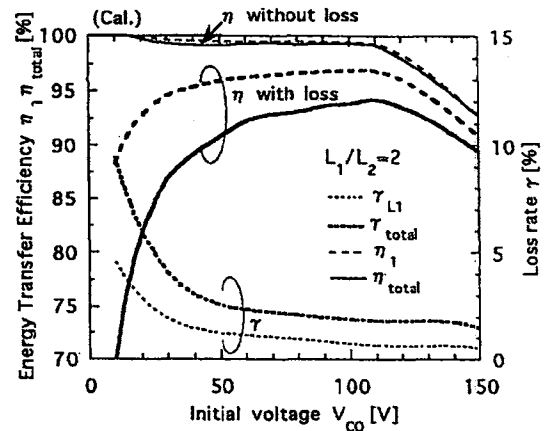


Fig.8 Initial voltage dependence of Energy Transfer Efficiency

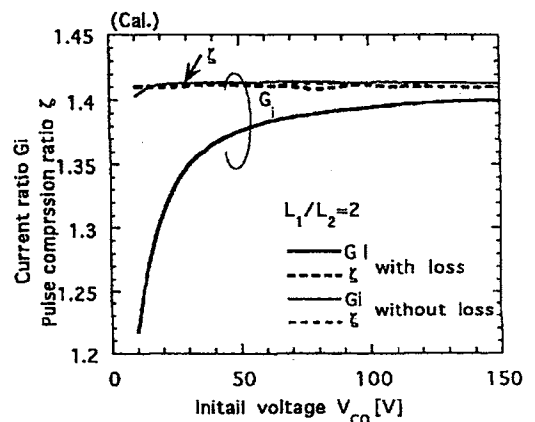


Fig.9 Initial voltage dependence of G_i and ζ

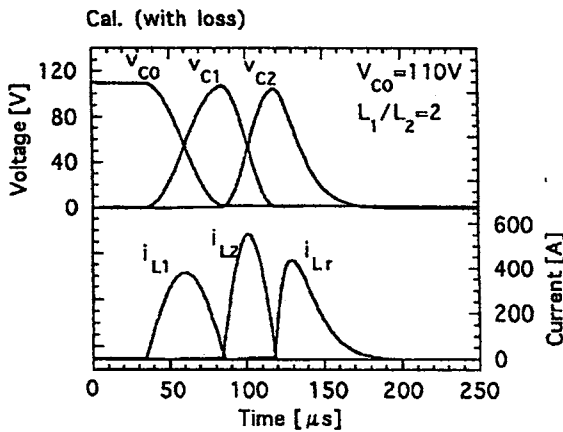


Fig.10 Calculated waveforms ($V_{co} = 110V$)

4.2 未飽和区間依存性

L_1 と L_2 の比率を一定とし L_1 の値を変化させることにより未飽和区間を変化させ、解析を行った。Fig.11 に初期電圧が 20V の時のエネルギー転送効率と損失比の未飽和区間依存性を、Fig.12 に電流利得とパルス幅圧縮率の未飽和時間依存性を示す。ただし、横軸の未飽和区間は、 L_1 の未飽和区間とした。Fig.11 より、未飽和区間が短くなるにつれ損失比は増加し、効率は低下する。これは、未飽和区間の短縮によって磁心内の誘起電圧が上昇し、うず電流損が増加するためである。未飽和区間を $200\mu s$ から $100\mu s$ 短縮すると効率は 15.2% 低下し、電流利得は 0.10 低下する。未飽和区間を長くすれば効率及び利得は向上するが、未飽和区間を長くするために L_1 の値を大きくしているため電流のピーク値は小さく、通流幅は広がり、より高峻

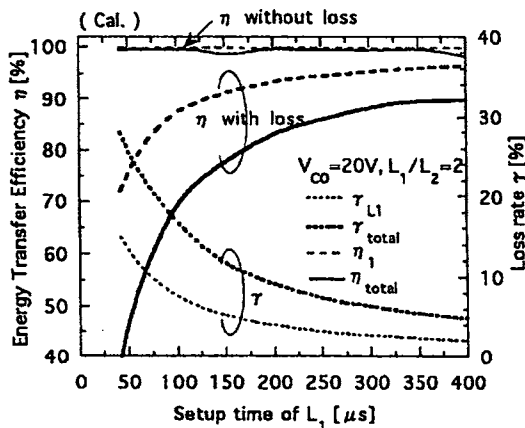


Fig.11 Setup time dependence of Energy Transfer Efficiency

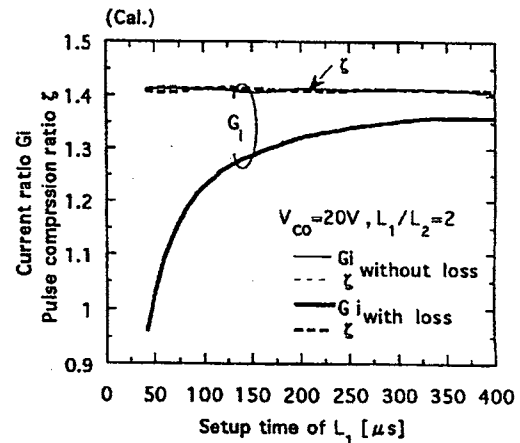


Fig.12 Setup time dependence of G_i and ζ

度な大電流パルスを得るには不都合である。

5 まとめ

本稿では、磁心損失が磁気パルス圧縮動作におよぼす影響を初期電圧依存性および未飽和区間依存性から調べた。その結果、初期電圧依存性から、磁心損失によって効率の最大となる初期電圧が存在することが明らかになった。また、未飽和区間依存性から、未飽和区間の短縮は、磁心損失の増加を招き、電流利得および効率の低下につながることを示された。

以上、磁心損失としてうず電流損を考慮した結果、うず電流損による磁気パルス圧縮回路の効率および電流利得低下が明らかになった。今後は磁心損失として磁性材料固有のヒステリシス損も考慮に入れて磁気パルス圧縮回路の解析を進めていく。

(1995年5月1日受付)

参考文献

- [1] 柳父：パルスパワー技術とその応用，オーム社，(1992)
- [2] 岩原他：電気学会マグネティックス研究会資料，MAG-94-22，(1994)
- [3] T.Teranishi, et al：Proc.9th IEEE Pulsed Power Conference (to be published)
- [4] 岩原他：第3回 MAGDA-コンファレンス要旨集，pp.77-80，(1994)