シミュレータを用いたインバータ点灯回路の 非線形インダクタの設計に関する研究

専門会員 福原 稔* 掛橋 英典* 正会員 塩見 務*
専門会員 野口 透**

Study on Design Method using Circuit Simulator
for Non-Linear Inductors in Inverter Circuits.

Minoru Fukuhara (Fellow Member), Hidenori Kakehashi, Tsutomu Shiomi (Member)

(Matsushita Electric Works, Ltd.)

Toru Noguchi (Fellow Member) (Setsunan University)

ABSTRACT

Because of several distinct advantages, inverter circuits are widely used to operate discharge lamps. One of the issues in the development of inverter circuits is to reduce the weight and size of the inverter. It is therefore necessary to reduce the size of the electronic components, especially the inductors.

In this paper, a non-linear magnetic model developed by Potter is used to simulate the characteristics of inductors. The model shows good approximation for the magnetic characteristics of thin ribbon and ferrite materials. The model is adapted for the resonance inductors used in the inverter circuits for fluorescent lamps, and the filter chokes for HID lamps. The wave-forms in inverter circuits obtained by the simulation agree well with those of the experimental results.

1. はじめに

住宅、店舗、オフィスのインテリジェント化が進行する中で快適性向上、地球環境保護を考慮した電気設備、システムがますます求められている。放電灯点灯システムにおいても多様化するニーズ、省エネニーズに応えるシステムが重要となってきた。近年インバータ点灯回路が広く普及してきたのはこの背景による。インバータ点灯回路はスイッチング素子を用いて放電灯の高周波点灯を行なうもので、スイッチング周波数を数十kHzへ高めることによりトランス、インダクタ、コンデンサ等を小型化し、かつIC制御回路により任意の点灯制御が可能となる。インバータ点灯回路の最大の課題はさらなる小型、軽量化であり、このためには高周波化と共に回路方式と使用される電子部品の最適化が求められ、特に高周波トランス、インダクタ等の磁気素子とその鍵をにぎっている。

インバータ点灯回路はそのランプ負荷（蛍光灯、高圧放電灯、ハロゲン電球等）により多種多様なものがあり、また用途（住宅、店舗、ビル等）によりその機能も多岐にわたる。インダクタの設計にあたっては負荷、機能による回路動作を考慮しながら小型化を図らなければならない。しかしながら従来の実験設計では非常に回路動作が複雑なため、インダクタの最適化設計は困難であっ

た。

近年のコンピュータの高速化、大容量化、SPICEに代表される回路シミュレーション解析技術の進展に伴いインバータ点灯回路のシミュレーションも可能になりつつある。その場合インダクタの非線形性を考慮して回路解析を行い、インダクタ特性が回路の動作特性に与える影響を評価する必要がある。

そこで本論ではまず、シミュレーションのための磁性材料の交流ヒステリシスモデルについて述べ薄帯材料およびフェライト材料で実測対比を行なう。次に、蛍光灯点灯回路用共振インダクタ、高輝度放電灯点灯回路用フィルタチョークの設計例からシミュレーションの有用性を検証する。

2. 交流ヒステリシスモデル

インダクタの非線形特性を考慮して回路解析を行なうためにはコアの磁束密度Bと磁化力Hの関係式が必要である。一般に、磁化力と磁束密度の関係を多項式で表すモデルが使用されているが、計算が複雑であること、鉄損を表現出来ないなどの課題がある。ヒステリシスを双曲線関数形で表すPotterモデル^{1),2),3)}はパラメータが少なく、計測も容易で実用的である。このモデルではメジャー・ヒステリシスループにおける飽和磁束密度 B_s 、保磁力 H_c および角型比 S とすると、磁束密度Bと磁化力Hの関係は次式で記述される。

$$B = B_s \cdot \left[\operatorname{sgn} \alpha - \alpha \cdot \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{H_c - H \operatorname{sgn} \alpha}{H_c} \cdot \tanh^{-1} S \right) \right\} \right] \quad (1)$$

・ 松下電工株式会社 照明開発研究所
〒571 大阪府門真市門真1048
・ 摂南大学工学部
〒572 大阪府寝屋川市池田中町17-8

α はヒステリシスの履歴によって変化する値で、 n 回目のループの値 α_n とその直後のループの α_{n+1} の間には次の関係がある。

$$\alpha_{n+1} = -\frac{2 \cdot \operatorname{sgn} \alpha_n - \alpha_n \cdot \left\{ 1 + \tanh \left(\frac{H_c - H_m \cdot \operatorname{sgn} \alpha_n}{H_c} \cdot \tanh^{-1} S \right) \right\}}{1 + \tanh \left(\frac{H_c + H_m \cdot \operatorname{sgn} \alpha_n}{H_c} \cdot \tanh^{-1} S \right)} \tag{2}$$

ここで H_m はヒステリシスの最大磁化力でこの点で α を決定する。また α の初期値 α_0 は次式で表される。

$$\alpha_0 = \pm \frac{1}{1 + S} \tag{3}$$

次に、高透磁率材料で数十 kHz での Potter モデルの妥当性について調べた。薄帯磁性材料として極微細結晶合金（日立金属製ファインメット[®]）とフェライト（日立フェライト製 SB7H）のリングコアを用いてヒステリシス曲線の実測とモデルによる計算結果との対比を行なった。図 1 は 50kHz、最大磁化力 150A/m でのファインメット[®]の実測値、計算値および 50kHz、最大磁化力 200 A/m におけるフェライトの値を示している。尚、計算は、ファインメット[®]の飽和磁束密度 B_s 1.1T、保磁力 H_c 80A/m および角形比 S 0.7、フェライトについては飽和磁束密度 B_s 0.5T、保磁力 H_c 35A/m および角形比 S 0.4として、(1)～(3)式によっている。ヒステリシスの近似は良好である。

図 2 はファインメット[®]、フェライトの各々について 50kHz の正弦波磁束条件で、最大磁化力 H_m を変化させて最大磁束密度 B_m

図 1 交流 (50kHz) B-H ヒステリシス曲線
Fig.1 B-H hysteresis curve at A.C.50kHz

を導出した磁化曲線で、実線は実測値、点線は計算値を示している。実測値と計算値の一致は良好でモデルは磁化曲線を良く表現している。

図 3 はファインメット[®]、フェライトの各々について 50kHz の正弦波磁束条件で、最大磁束密度 B_m を変化させて鉄損を導出したもので、実線は実測値、点線は計算値を示している。フェライトでは磁束密度が 100mT から 300mT の範囲で、実測値と計算値は良く一致する。100mT 以下では、磁束密度が低下する程違いが大きくなる。また、ファインメット[®]では 200mT から 300mT で良く一致し、磁束密度が低い範囲では差は大きくなる。

この結果からモデルは 100mT から 300mT 程度の B_m で設計されるものについては誤差が少ない。インバータ回路に用いられるインダクタは、この範囲の B_m で設計されることが多いため、実用

図 2 磁化曲線
Fig.2 Magnetization curve

図 3 鉄損曲線
Fig.3 Core loss curve

上の精度は十分である。

3. 蛍光灯点灯回路用共振インダクタ

蛍光灯点灯回路（40W）ではランプ電流を正弦波に近付けるために図4に示すようなハーフブリッジ方式共振形インバータ回路が用いられている。回路はFET1, FET2, インダクタL, コンデンサC1, ランプ, ランプフィラメントを介してC1と並列に接続されるC2, および分圧コンデンサC3, C4で構成される。表1に仕様を示す。蛍光灯始動のメカニズムは次の方法によっている。ランプは不点灯状態では極めて高いインピーダンスを持つ。この時、インダクタLとコンデンサC1およびC2で共振回路が形成される。インダクタLを線形素子とすると、周波数に対するランプ両端電圧 V_{C2} 及びインダクタ電流 I_L は図5の特性を示す。まず、ランプフィラメントからの電子放出を容易にするために周波数60kHzで動作させ、フィラメント予熱を約1秒間行なう。この時ランプ両端電圧 V_{C2} はA点で100V程度であり放電開始電圧400V以下である。その後、周波数を60kHz（A点）から49kHz（B点）まで徐々に減少させて V_{C2} およびインダクタ電流 I_L を増加させる。この過程で、もし磁気飽和を起こすとインダクタンスが減少し、過大ピーク電流が回路、よってFETに流れFETを損傷する。そこで交流ヒステリシスモデルを用いてA点からB点に至る過程

図4 ハーフブリッジ方式蛍光灯点灯回路
Fig.4 Half-bridge type fluorescent lamp operating circuit

表1 40W 蛍光灯点灯回路仕様
Table.1 Specification of the circuit for 40W fluorescent lamp

項目		定数
L	インダクタンス (小振幅時)	250 μ H
	磁路断面積	90 mm ²
	磁路長	50 mm
	巻数	5.0 Turn
C1		35 nF
C2		15 nF
C3, C4		0.47 μ F
E		141 V

の解析を行なった。

図6はフェライトでインダクタを形成し、100 μ sの間に動作周波数を60kHzから49kHzまで減少させた場合のFET2のドレイン電流の実測波形、および計算波形である。実測波形で60kHzから徐々に周波数を減少させて行くに従って、電流のピーク値は増大し、70 μ s付近で急峻なサージ電流が発生する。計算結果も同様に電流ピーク値の増大とサージ電流の発生を示す。発生タイミングはほぼ実測と一致する。

次に解析により材料の比較を行なった。フェライト、ファインメット[®]で同一形状、巻線条件で形成したインダクタを用い300 μ sの間に60kHzから49kHzまで減少させた場合のインダクタ電流 I_L およびFET2のドレイン電流 I_d の計算波形を図7(a), (b)に示す。フェライトでは200 μ s付近で飽和が始まりドレイン電流にサ

図5 不点灯状態におけるランプ両端電圧 V_{C2} 、インダクタ電流 I_L の周波数特性
Fig.5 Frequency v.s. Output-voltage V_{C2} and Inductor-current I_L undre unlighted condition

(a) 計算波形

(b) 実測波形

図6 FET2のドレイン電流波形
Fig.6 Drain current wave-form of FET2

図7 各材料による共振インダクタでの解析波形
 I_L : インダクタ電流 I_d : FET2のドレイン電流
 Fig.7 Simulated wave-form for each oscillation inductors core material

ージが現れる。ファインメット[®]では電流は増加するが飽和現象はみられない。

次に、ファインメット[®]でFETのドレイン電流が許容ピーク電流値20Aになる飽和磁束密度を調べた。ファインメット[®]のヒステリシスモデルのパラメータのうち、飽和磁束密度 B_s を0.7Tまで減少させた。300 μ s近傍で図7(c)の電流波形に、約20A程度のサージ電流が現れる。この時のヒステリシス波形を図8に示す。

このことから、飽和磁束密度が1.1Tのファインメット[®]ではFETの許容電流の点でまだ余裕を持つため、小型化の可能性があることがわかった。

4. 高輝度放電灯点灯回路用フィルタチョーク

高輝度放電灯（High Intensity Discharge Lamp；以下 HID と略す）は、放電管内の圧力が極めて高く、加えられる電力の時間的変化により、放電アークに定在波が発生することがある。これは一般に音響的共鳴現象と呼ばれ、ランプの形状や封入物により発生する周波数が異なるが、概ね数kHz～数100kHzの範囲に分布している⁴⁾。この現象により、光がちらついたり甚だしい場合には放電管の破壊に至ることがある。

即ち、HIDを数10kHzのインバータ回路で点灯することは音響的共鳴現象の発生のため極めて困難である。

そこで、HIDランプに適合する電子点灯装置の一つの手段として、低周波の矩形波を用いたものがある⁵⁾。その回路の一例を図9

図8 FETのドレイン電流が許容での磁性材料の交流(50kHz)ヒステリシス曲線 計算値
 Fig.8 B-H hysteresis curve at A.C.50kHz of the core (Simulated)

図9 フルブリッジ方式 HID 点灯回路
 Fig.9 Full-bridge type H.I.D lamp operating circuit

に示す。この回路はトランジスタQ1、Q2、Q3、Q4及びインダクタL1、L2、コンデンサC1で構成されるフルブリッジ方式の低周波インバータである。動作は、まずQ2、Q3がオフ、Q4がオンの状態でQ1を一定期間高周波スイッチングさせることにより、降圧チョップ回路が形成され、図中ランプ電流 I_{LA} の極性でランプに電流が流れる。一定期間後、Q1、Q4をオフ、Q3をオンにしQ2を一定期間高周波スイッチングさせる。これにより前述と逆極性の降圧チョップ回路が形成され、図中 I_{LA} の逆極性でランプに電流が流れる。ここで、上記の高周波スイッチングによりL1には高周波電流が流れるが、C1及びL2より構成される高周波フィルタによりランプ電流 I_{LA} は高周波成分の少ない直流電流となる。この2動作を低周波で交互に繰り返すことで、ランプを低周波矩形波で点灯させる。実測したランプ電流波形の一例を図10に示す。実測ではL2のコア材にファインメット[®]を用いた。

この方式ではQ1もしくはQ2が高周波スイッチングをするため、 I_{LA} には高周波成分が重畳される。この高周波成分の割合が増加すると先述の音響的共鳴現象が発生する。音響的共鳴現象が顕著に発生する I_{LA} の実効値に対する高周波成分の割合を図11に示す⁶⁾。この高周波成分を除去するためにC1とL2を図9の回路では用いている。従って、L2の設計により音響的共鳴現象の発生度合

図10 ランプ電流波形 (実測値)
Fig.10 Lamp current wave-form (Observed)

図11 高周波成分の割合と音響的共鳴現象の関係 (一例)
Fig.11 Relation between ripple rate of the high-frequency current and the acoustic resonant phenomenon (for example)

が左右される。

そこで、我々はこの点に着目し、前節に用いた交流ヒステリシスモデルにより L2の高周波成分除去特性を検証した。

始めに、図10の実測と同様、L2にファインメット[®]を用いて解析を行った。この時のランプ電流の計算波形を図12に示す。図10の実測値とよい一致を示す。次に、L2のコアをフェライトに変更して解析した。ランプ電流波形を図13に示す。このランプ電流波形では高周波成分が著しく増加しており、音響的共鳴現象が発生する恐れが高いことを示している。尚、図14には図12及び図13で得られたランプ電流波形の高周波成分を拡大して示している。図13の高周波成分の振幅は図12のそれの5～6倍になっている。これは、インダクタが直流バイアスされており、フェライトでは高周波成分で磁気飽和が発生しているためである。

この点灯方式においてはコアが直流バイアスされている状態で高周波が重畳されるため、L2の設計ではコアの直流バイアス下におけるインダクタンスを制御する必要がある。

そこで直流バイアス値を一定とし、コアの飽和磁束密度と高周波成分の関係を交流ヒステリシスモデルを用いて調べた。

図15にその結果を示す。解析の条件は磁路長77mm、磁路断面148mm²、巻数30Tで0.8Aの直流でバイアスしている。この例においては飽和磁束密度 B_s が0.8T以上であれば高周波成分含有率を十分低く抑えられ、音響的共鳴現象の発生しない安定な放電を得られ

図12 ランプ電流波形解析例 (ファインメット)
Fig.12 Simulated lamp current wave-form (Finemet)

図13 ランプ電流波形解析例 (フェライト)
Fig.13 Simulated lamp current wave-form (Ferrite)

図14 解析によるランプ電流の高周波成分
Fig.14 Simulated ripple current

図15 飽和磁束密度と高周波成分含有率の関係
Fig.15 Relation between saturation flux density and ripple rate of the high-frequency current

る。具体的には、ファインメット[®]をコア材として用いれば、音響の共鳴現象を回避するに十分な特性をもつインダクタが得られる。

このように、交流ヒステリシスモデルを用いると、インダクタの直流バイアス下での高周波成分の抑制効果を予測できるので、低周波矩形波方式のHID点灯回路で音響の共鳴現象を回避するために必要なフィルタチョークの設計が容易にできる。

5. 結論

放電灯点灯回路に用いられるインダクタの限界設計、最適化設計を行なうために、非線形磁気特性を考慮した回路シミュレーションについて検討を行なった。

得られた結果は以下の通りである。

(1) 磁性材料の非線形特性を双曲線関数で表す交流ヒステリシスモデルは、数十kHzで大振幅励磁する極微細結晶合金(ファインメット[®])、フェライト等の高透磁率材料の磁気特性を良く近似できる。

(2) 蛍光灯点灯回路の共振インダクタへモデルを適用して、始動過程での共振回路の過渡的な動作解析を行った。磁気飽和と各部の波形を形良く表現できる。

(3) 高輝度放電灯点灯回路のフィルタチョークへモデルを適用した。直流バイアス下のインダクタ特性が良く表現できる。これを用いて音響の共鳴現象回避に有効なインダクタの特性を求める設計手段を得た。

(受付 1993年5月11日/採録 1993年8月10日)

参 考 文 献

- (1) M. Tabrizi. : "Simulation and Analysis of Power Circuit for Higher Performances and Reliability Using the Power Design Tool Kit", Proc. Power CAD '87 Conf., Los Angeles, California.
- (2) 榎園, 池下: "有限要素法によるヒステリシス損失の解析", 電学論(A), 109, 6, pp. 247-254 (1989).
- (3) R. I. Potter, R. J. Schaulian. : "Self-consistently Computed Magnetization Patterns in Thin Magnetic Recording Media", IEEE Trans. Magn., MAG-7, 4, pp. 873-880 (1971).
- (4) J. H. Campbell. : "Initial characteristics of High-Intensity Discharge Lamps on High-Frequency Power", J. Illum. Engng. Soc., 64, 12, pp. 713-723 (1969).
- (5) H. Nishimura, H. Nagase, K. Uchihashi, T. Shiomi, M. Fukushima. : "A New Electronic Ballast for HID Lamps", J. Illum. Engng. Soc., 17, 2, pp. 70-76 (1988).

ふくはら みのる (専門会員)

昭和9年7月30日生まれ。昭和32年3月大阪大学工学部電気工学科卒業。同年4月松下電工株式会社に入社。現在、照明開発研究所所長。昭和63年日本照明賞、電気学会会員。

かけはし ひでのり (非会員)

昭和31年10月17日生まれ。昭和55年3月九州大学工学部電気工学科卒業。同年4月松下電工株式会社に入社。現在、照明開発研究所に勤務。磁気部品、放電灯安定器の研究開発に従事。電気学会、日本応用磁気学会会員。

しおみ つとむ (正会員)

昭和33年6月28日生まれ。昭和56年3月関西大学工学部電子工学科卒業。同年4月松下電工株式会社に入社。現在、照明開発研究所に勤務。HID用電子点灯装置の研究開発に従事。昭和63年日本照明賞。

のぐち とおる (専門会員)

昭和6年6月27日生まれ。昭和34年京都大学大学院工学研究科電気工学専攻修士課程修了。京都大学工学研究所助手。工学部助教授を経て、昭和55年摂南大学工学部教授。現在に至る。この間、プラズマの工学的応用研究としての放電ランプおよびMHD発電の研究、照明工学分野の教育研究に従事。工学博士 昭和57年照明学会賞 電気学会、電気設備学会、日本照明委員会会員。