

# 広帯域で大きなインダクタンスをもつハイブリッドインダクタの検討

## Examination of Hybrid Inductor with Large Inductance in Wide Band

鳥島健太<sup>a)</sup>・志村和大<sup>a)</sup>・佐藤光秀<sup>a)</sup>・水野勉<sup>a)†</sup>・松岡孝<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup>信州大学工学部, 長野県長野市若里 4-17-1 (〒380-8553)

<sup>b)</sup>日本ケミコン株式会社, 東京都品川区大崎 5-6-4 (〒141-8605)

K. Torishima<sup>a)</sup>, K. Shimura<sup>a)</sup>, M. Sato<sup>a)</sup>, T. Mizuno<sup>a)†</sup>, and T. Matsuoka<sup>b)</sup>

<sup>a)</sup> Faculty of Engineering, Shinshu Univ., 4-17-1 Wakasato, Nagano-city, Nagano 380-8553, Japan

<sup>b)</sup> Nippon Chemi-Con, Corp., 5-6-4 Osaki, Shinagawa-ward, Tokyo 141-8605, Japan

Many circuits, such as power supply circuits, generate ripples and noise derived from switching. Therefore, power inductors and filter inductors are essential to these circuits. The authors have developed "Hybrid inductor" that maintain high inductance over a wider frequency band than conventional inductors. The hybrid inductor not only has excellent frequency characteristics, but also has excellent DC bias characteristics. As a result, the inductance of the hybrid inductor increased by 19.6% near DC and 52.0% at 30 MHz, compared to the conventional inductor. In addition, at  $I_{DC} = 60$  A, the inductance increased by 32.6%.

**Key words:** Hybrid inductor, Composite core, Frequency characteristic, DC superposition characteristics

### 1. まえがき

スイッチング素子が用いられる回路の電源ラインには、スイッチングに由来するリップル電流やノイズが発生する<sup>1)</sup>。一般的に、これらのリップルおよびノイズを減衰させるために、パワーインダクタやフィルタインダクタが使用される。これらのインダクタは数十 kHz~数十 MHz までの高調波成分を有したノイズを抑制するために、高い周波数においても大きいインダクタンスを維持することが求められる<sup>2)</sup>。また、これらのインダクタは一般的に直流電流が重畳した状態で使用されるために、優れた直流重畳特性が求められる<sup>3)</sup>。

一方で、これらのパワーインダクタやフィルタインダクタには、Mn-Zn 系フェライトや圧粉コア、アモルファスシートなどが頻繁に用いられる<sup>4)</sup>。これらの磁性材料は高透磁率であるが、高周波では透磁率が大きく減少する。また、インダクタに大電流や直流電流が重畳して流れる場合には、コアの透磁率が減少するためにインダクタンスが減少する。そのために、従来のパワーインダクタやフィルタインダクタは、広帯域で高インダクタンスを維持することや、直流重畳電流通電時に高インダクタンスを維持することが困難である。

そこで、筆者らは複数種類の磁性材料をコアとして有する「ハイブリッドインダクタ」を検討している。ハイブリッドインダクタとは、Mn-Zn 系フェライトや圧粉コア、アモルファスシートなどの高透磁率材料と、周波数特性に優れた低透磁率材料とを組み合わせたコアを使用したインダクタである。高透磁率材料だけで構成されたコアを使用したインダクタと比較して、高周波帯でのインダクタンスの

低下が抑制される点が特長である。

筆者らはハイブリッドインダクタの低損失コア材料として、加工性に優れた磁性コンポジット材料<sup>5)</sup>を採用した。既製のインダクタに磁性コンポジット材料を装荷することで、容易にハイブリッドインダクタの構造を形成し、周波数特性が向上する。また、飽和磁束密度の大きい磁性コンポジット材料を使用することで、直流重畳特性も向上するハイブリッドインダクタを検討した。

本論文では、従来のフィルタインダクタと磁性コンポジット材料を採用したハイブリッドインダクタとの、構造と磁気特性、およびインピーダンス特性の測定結果の比較を述べる。

本論文では、以下の事項について述べる。

- (1) ハイブリッドインダクタの構造
- (2) コア材料の磁気特性
- (3) ハイブリッドインダクタのインピーダンス-周波数特性
- (4) ハイブリッドインダクタの直流重畳特性

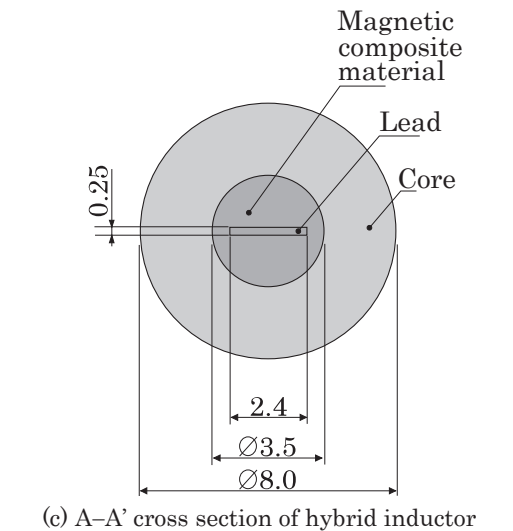
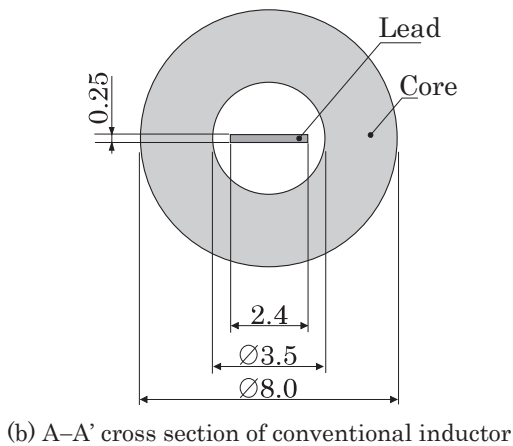
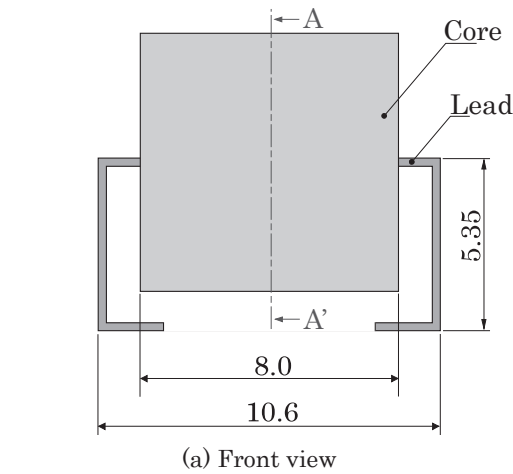
### 2. ハイブリッドインダクタの構造と磁気特性

#### 2.1 インダクタの構造

Fig. 1 に、従来構造のインダクタとハイブリッドインダクタとの構造を示した。Fig. 1(a) および (b) に示したように、従来構造ではロール状に巻かれたメットグラス<sup>®</sup> (2605SA1) のコアの中空に、リード線が貫いた構造となっている。コアの寸法は内径 3.5 mm, 外径 8.0 mm, 軸方向の長さは 8.0 mm である。リード線の材質は銅で、寸法は幅 2.4 mm, 厚さ 0.25 mm である。

Fig. 1(c) に、ハイブリッドインダクタの断面図を示した。従来構造のリード線周囲のコア中空部に、磁性コンポジット材料が充填されている。磁性コンポジット材料は低損失

連絡先: 水野勉<sup>†</sup>, 〒380-8553 長野市若里 4-17-1  
信州大学工学部電気電子工学科西棟 水野・ト研究室,  
E-mail:mizunot@shinshu-u.ac.jp

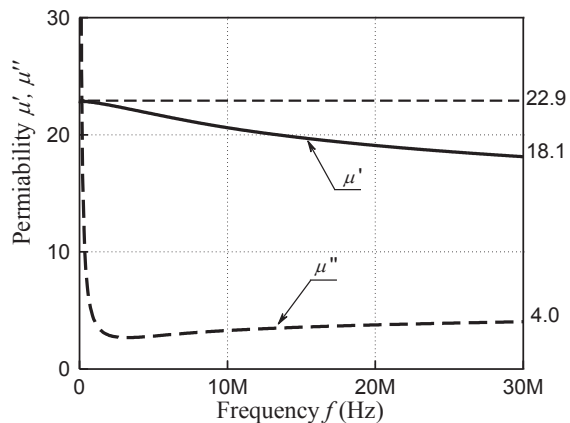
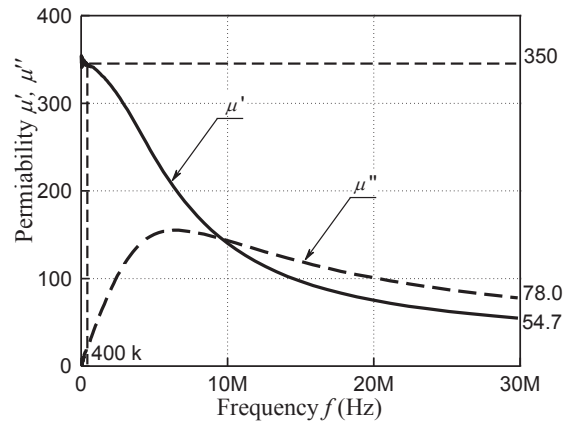


**Fig. 1** Structure of inductors (unit: mm).

かつ周波数特性に優れる反面、メットグラス®と比較して低透磁率である。しかし、リード線近傍に充填されることにより、インダクタのインダクタンスが大きく増加することが期待される。

## 2.2 磁性材料の透磁率-周波数特性

Fig. 2(a) に、従来構造のインダクタのコア材の複素比透磁率-周波数特性を示した。2605SA1 の複素比透磁率の実部

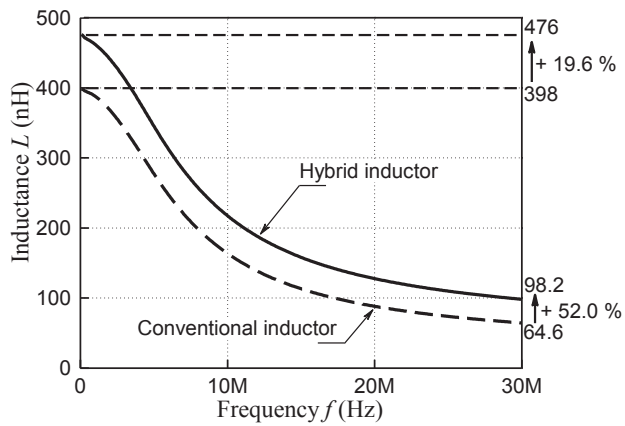


**Fig. 2** Complex relative permeability vs. frequency of core materials.

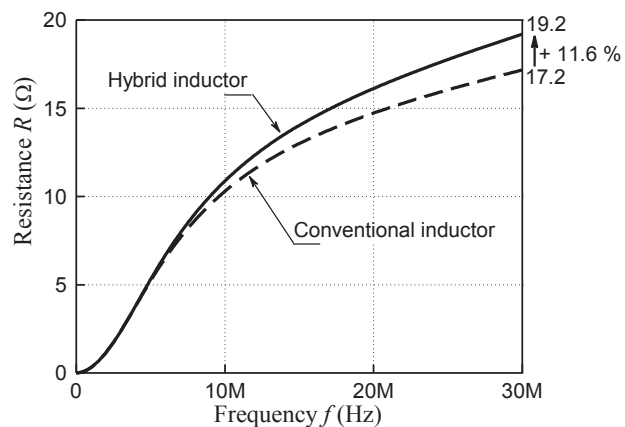
$\mu'$  は、周波数 400 kHz 程度までの低周波領域では 350 である。しかし、500 kHz 以上の高周波帯では  $\mu'$  が急激に減少する。周波数 30 MHz において、複素比透磁率の実部  $\mu' = 54.7$  である。複素比透磁率の実部  $\mu'$  が増加すると同時に、虚部  $\mu''$  は周波数に対して急激に増加する。また、2605SA1 の飽和磁束密度はカタログ値で 1.56 T である。

Fig. 2(b) に、ハイブリッドインダクタに用いた磁性コンポジット材料の複素比透磁率-周波数特性を示した。磁性コンポジット材料は、平均粒径  $D_{50} = 46 \mu\text{m}$  および  $10 \mu\text{m}$  の 2 種類の鉄系アモルファス球粉の混合粉とシリコーン樹脂 (KE-1031A/B, 信越化学工業(株)) とを、混合粉の体積充填率が 75.6 vol.% となるように混合、攪拌して製作した。磁性コンポジット材料の  $\mu'$  は、直流付近と 30 MHz においてそれぞれ 22.9, および 18.1 である。このことから、メットグラスと比較して周波数特性に優れる。また、30 MHz において  $\mu' = 4.0$  であり、メットグラスと比較して低損失である。磁性コンポジット材料の飽和磁束密度は 800 mT であり、周波数特性に優れるフェライト材などと比較して大きい。そのために、直流重畳特性の向上効果も期待できる。

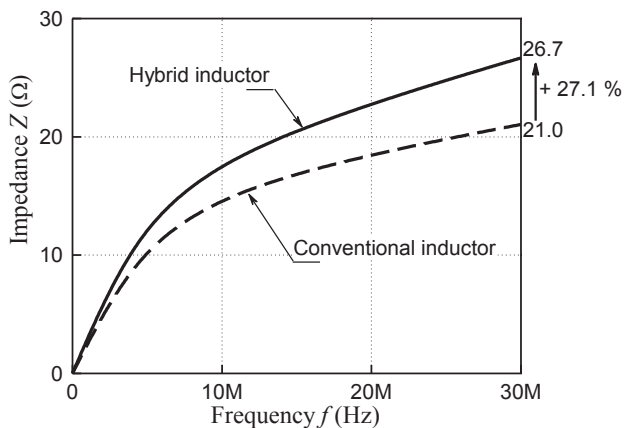
磁性コンポジット材料は硬化前の状態が非常に柔軟であ



(a) Inductance



(b) Resistance



(c) Impedance  $Z$

**Fig. 3** Impedance vs. frequency characteristics of inductors.

ることや、バインダとなる樹脂材料を任意に選定できることから、加工性に優れる。また、混合する磁性粉末の種類や充填率を任意に選定できることから、透磁率・周波数特性をはじめとする磁気特性を柔軟に変化させることができる。

### 3. ハイブリッドインダクタのインピーダンス-周波数特性

Fig. 3に、ハイブリッドインダクタのインピーダンス-周

波数特性を示した。測定にはインピーダンスアナライザ (E4990A, キーサイト・テクノロジー(株)) を用いた。

Fig. 3(a)に、インダクタンス-周波数特性を示した。直流付近における従来構造のインダクタとハイブリッドインダクタのインダクタンスは、それぞれ 398 nH, 476 nHであった。従来構造のインダクタと比較して、ハイブリッドインダクタのインダクタンスは 19.6%増加した。周波数 30 MHzにおける従来構造のインダクタとハイブリッドインダクタのインダクタンスは、それぞれ 64.6 nH, 98.2 nHであった。従来構造のインダクタと比較して、ハイブリッドインダクタのインダクタンスは 52.0%増加した。従来構造のインダクタは、Fig. 2(a)に示したコアの複素比透磁率-周波数特性の傾向と同様に、インダクタンスが周波数に対して減少した。一方、ハイブリッドインダクタは透磁率-周波数に優れた磁性コンポジット材料を装荷しているために、低周波から高周波にかけてインダクタンスの増加した。

Fig. 3(b)に、抵抗-周波数特性を示した。周波数 30 MHzにおける従来構造のインダクタとハイブリッドインダクタの抵抗は、それぞれ 17.2 Ω, 19.2 Ωであった。従来構造のインダクタと比較して、ハイブリッドインダクタの抵抗は 11.6%増加した。従来構造のインダクタと比較して、ハイブリッドインダクタは磁性コンポジット材料における鉄損が増加するために、抵抗が増加する。

Fig. 3(c)に、インピーダンス-周波数特性を示した。周波数 30 MHzにおける従来構造のインダクタとハイブリッドインダクタのインピーダンスは、それぞれ 21.0 Ω, 26.7 Ωであった。従来構造のインダクタと比較して、ハイブリッドインダクタのインピーダンスは 27.1%増加した。従来構造と比較して、ハイブリッドインダクタはインダクタンスおよび抵抗の双方が増加するために、低周波から高周波にかけてインピーダンスが増加する。本ハイブリッドインダクタは従来構造のインダクタと比較して、フィルタ特性の向上が期待できる。

### 4. ハイブリッドインダクタの直流重畳特性

パワーインダクタやフィルタインダクタの多くは、実際に回路で使用される際に直流の大電流が流れる。そのために、直流電流重畳時にもハイブリッドインダクタのインダクタンスの増加効果が現れることを確認するために、直流重畳特性を測定した。

Fig.4に周波数  $f=100$  kHzにおけるハイブリッドインダクタのインダクタンス-直流電流特性を示した。測定には LCR メータ (ZM2376, (株) エヌエフ回路設計ブロック) および直流電源 (DC30-108, (株) エヌエフ回路設計ブロック) を用いた。

直流重畳電流  $I_{DC}=60$  Aにおける従来構造のインダクタ、およびハイブリッドインダクタのインダクタンスは、それぞれ 144 nH, 191 nHであった。従来構造のインダクタと

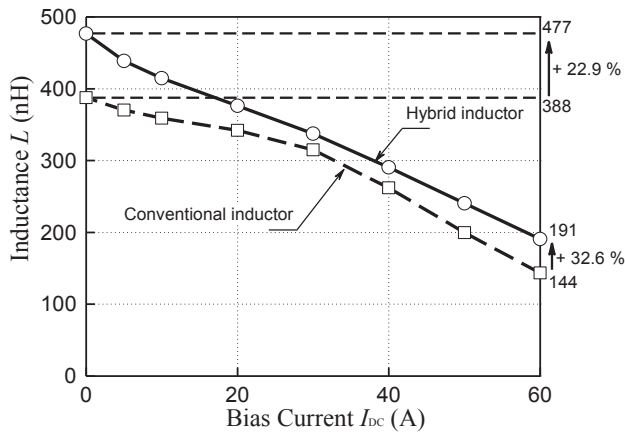


Fig. 4 Inductance vs. DC bias current characteristics of inductors. ( $f=100$  kHz)

比較して、ハイブリッドインダクタのインダクタンスは32.6%増加した。直流重畳電流が大きくなるにしたがって、双方のインダクタのインダクタンスは減少した。しかし従来構造と比較して、本ハイブリッドインダクタは低損失磁性材料に飽和磁束密度が大きい磁性コンポジット材料を使用しているために、直流重畳特性が向上した。

## 5. あとがき

本論文で述べたことは以下の事項である。

### (1) ハイブリッドインダクタの構造と磁気特性

従来構造のインダクタのコアは、周波数 400 kHz 以下の低周波領域で透磁率  $\mu = 350$  であるが、周波数 400 kHz 以上の高周波領域で透磁率が減少する。ハイブリッドインダクタの低損失磁性材料は磁性コンポジット材料は、30 MHz において  $\mu = 18.1$  と低透磁率であるが、周波数特性に優れる。そのために、ハイブリッドインダクタは高周波においてもインダクタンスが大きい。

(2) ハイブリッドインダクタのインピーダンス-周波数特性  
直流付近および 30 MHz において、ハイブリッドインダクタのインダクタンスは従来構造のインダクタと比較して、それぞれ 19.6 %、52.0 % 増加した。周波数特性に優れた磁性コンポジット材料を使用することで、低周波から高周波にかけてインダクタンスが増加した。

### (3) ハイブリッドインダクタの直流重畳特性

周波数 100 kHz、直流重畳電流  $I_{DC} = 60$  A における従来構造のインダクタとハイブリッドインダクタのインダクタンスは、それぞれ 144 nH、191 nH であった。従来構造のインダクタと比較して、ハイブリッドインダクタのインダクタンスは 32.6 % 増加し、直流重畳特性が向上した。

今後はハイブリッドインダクタをフィルタ回路や電源回路に実装し、フィルタ特性や回路の効率向上を検討する。

**謝辞** 本研究は、JST, OPERA, JPMJOP1841 の支援を受け実施したものである。

## References

- 1) K. Harada: Switchingudengen Handobukku dai 2 han, pp.407-428, (Nikkankogyo Shimbunsha, Tokyo, 2000) (in Japanese).
- 2) H. Kumagaya: Dengenkairo Sekkei 2009, pp.33-40 (CQ Shuppan, Tokyo, 2009) (in Japanese).
- 3) J. Togawa: Switchingudengen no Koiru/Toransu Sekkei, pp.115-133 (CQ Shuppan, Tokyo, 2012) (in Japanese).
- 4) K. Yoshizawa: *JIM Materia Japan*, **56**, 186 (2017).
- 5) K.Sugimura, D.Shibamoto, N.Yabu, T.Yamamoto, M.Sonehara, T.Sato, T.Mizuno, and H.Mizusaki, *IEEE Trans. Magn.*, **53**, 2801406 (2017).

2019年10月11日受理, 2019年11月26日採録