新しい電子チョークの入カインピーダンス特性 —インダクタとの関係を主とした考察—

Input Impedance Characteristics of a New Electronic Choke: Considerations on their relation with inductors

松本正・甲木昭彦*

松下電工株式会社, 大阪府門真市大字門真 1048 (〒571-8686)

*九州工業大学情報工学部, 福岡県飯塚市川津 680-4 (〒820-8502)

T. Matsumoto and A. Katsuki*

Matsushita Electric Works, Ltd., 1048, Kadoma, Osaka 571-8686, Japan

*Faculty of Computer Science and Systems Engineering, Kyushu Inst. of Tech., 680-4 Kawazu, Izuka-shi, Fukuoka 820-8502, Japan

In most wire communication systems, communication lines are also used as power lines. Power is supplied to each terminal from a main power supply. The powered terminal needs to separate ac signals and dc supply in its input part connected to the communication lines. The main power supply and terminals need to have high impedance in order to prevent inflow of signals. Similarly, each terminal connected to the communication lines requires high impedance in our system, which consists of low-power switching power supplies. The powering terminal has a dc-dc converter that operates not only as a power supply but also as a transmitter. The powered terminal receives from the powering terminal the power it needs to operate. Each terminal has a new electronic choke. In this paper, the relation between inductors and the input impedance characteristics of the new electronic choke is investigated experimentally.

Key words: electronic choke, high impedance, inductor, power supply, powering terminal, powered terminal, wire communication system

1. まえがき

有線通信システムでは、通信線を信号伝送と共に直流電力供給線としても使用することが一般的である¹⁾。従来のシステムでは、通信線に接続される端末の電力は一台の主電源から供給される。この主電源は、すべての電力を賄うため電源容量の大きなものが必要である。また、主電源が故障した場合、あるいはメンテナンス等により主電源を停止させた場合は、各端末への電力供給が止まり、全てのシステムが停止してしまう。更に、端末増設により電源容量不足が生じた場合、大型の電源に置き換える必要があり、システムの拡張に不向きである。従って、信頼度およびアベイラビリティが低いという欠点を持つ。

これらの問題を解決するために、筆者らは、新しい有線通信システムを提案した²⁾。このシステムの特徴は、通信線に電源供給を行う給電端末と通信線から電源供給を受けて動作する受電端末との二種類の端末を持つ点である。

小型のスイッチング電源を内蔵した給電端末を並列接

続することで、一台あたりの電源容量を小さくすることができる。また、並列冗長系の構成により、信頼度、アベイラビリティが高いシステムとなる。受電端末は、給電端末から見れば並列接続された直流負荷となる。

従来のシステムにおいて、通信線から主電源側を見た信号に対するインピーダンスは、特に重要である。主電源はリップルやノイズ等を抑制するため高周波特性の良い平滑用コンデンサなどが出力に接続される。そのため、通信線から主電源を見たインピーダンスは低くなる。インピーダンスを高めるために主電源と通信線との間にチョークコイルを挿入する方法³⁾があるが、信号の最低周波数が低い場合や電源の直流出力電流が大きい場合は、コイルが大型化する傾向にある。そこで、コイルを除去した電子チョーク回路が考案されている⁴⁾。これは、能動状態にあるバイポーラトランジスタのベース接地の出力インピーダンスが高いことを利用しているが、直流電圧降下を一定に保つ特性があるため直流電流が大きい場合には電力損が増大してしまう。更に、直流電流の向きが一方方向に制限される。

筆者らが提案した新方式有線通信システムにおいても、通信線側から各端末を見た信号に対するインピーダンスは重要である。端末数を多くしたい場合は、通信線側から各端末を見た信号に対するインピーダンスが高い必要がある。接続することが出来る端末台数の限界は、大雑把に言えば、通信線の特性インピーダンスの大きさと端末の並列インピーダンスの大きさとが等しくなるという条件で決まるものと推測できる。新方式有線通信システムでは、直流電流を双方向に流すことができる電子チョークがあると、給電端末と受電端末とに同一の回路を用いることが出来るため、都合が良い。

これらを考慮に入れて、低インダクタンスのコイルを使いながら、信号に対して高いインピーダンスを示し、更に電力損が少なく、直流電流に対して双方向性であるというメリットを持つ新しい電子チョーク（以下、電子チョークと呼ぶ）を提案した⁵⁾。

提案した回路において、入力インピーダンスの周波数特性は、インピーダンスの大きさが高く、ある周波数範囲では抵抗性に近い位相角を持つことを実験と解析により確認した⁶⁾。また、電子チョークは、交流信号電圧と直流電源電圧を分離する役割も担う。直流出力端子に現れる交流信号の減衰特性について、実験と解析の比較を既に行い、測定結果と計算結果が良く一致することを確認している⁷⁾。しかし、電子チョークに用いられているインダクタを異なる巻線方法で作られたものと交換して実験すると、入力インピーダンスの周波数特性について、参考文献6)の解析では説明できない現象が観測される場合があることが分かった。本論文では、このような場合を含めて使えるような、より一般性のある解析を行うことを最終的な目的として、インダクタが入力インピーダンス周波数特性、特に重要な情報である低域ピーク周波数に与える影響について、考察する。

2. 電子チョーク

Fig. 1 の給電端末の動作を例に、電子チョークについて説明する。なお、受電端末の動作等は参考文献7)の Fig. A2

を参照されたい。スイッチにおいて、“T” は送信，“R” は受信を表す。“DC” および “AC” の矢印は、それぞれ直流電源電流の向き、交流通信信号の向きを示す。給電端末では、停電時の対策として無停電電源 (UPS) を内蔵する。リップル電圧を送信時のみ故意に大きくし、搬送波として利用することで送信を行う^{8) 9)}。この図においては、信号の変調方式として周波数変調 (FM) を採用している。端子 1・1' から信号が印加されるが、電子チョークにより、通信線からの信号に対する入力インピーダンスは高くなる。送信状態のとき電子チョークは、交流分と直流分を分離し、信号は端子 3・3' より受信器へと送られ、送信信号を受信器で検出することができる。

電子チョークの基本回路を Fig. 2 に示す。電子チョークは、端子 1・1' が通信線に接続され、交流信号電圧が入力される。そして、端子 3・3' 間から信号を取り出す。直流電源電圧は、端子 1・1' 間から印加された場合は端子 2・2' 間から取り出され、端子 2・2' 間から印加された場合は端子 1・1' から取り出される。前者は、送信状態の給電端末、送信状態および受信状態の受電端末に相当し、後者は、受信状態の給電端末に相当する。

Fig. 1 Operation of powering terminals.

直流電流は端子 1・2 間を双方向に通過することが出来る。インダクタの直流巻線抵抗を小さくすれば、電圧降下が小さくなるため、直流による電力損を抑えることが出来る。

3. L_M に二巻線インダクタを使用した場合の入力インピーダンス特性

実験に際し使用したインダクタの巻線構成を、Fig. 3 に示す。インダクタ L_M の線間容量が Z_n 特性に与える影響について検討するために、Fig. 3(a) に示すバイファイラー巻と、Fig. 3(b) に示す独立巻の、二種類の巻きのものを L_M に用いて比較検討した。共に四巻線構造であり、バイファイラー巻は二巻線を捩ったものが二組あり、二組の間は電氣的絶縁を施して巻いてある。独立巻は一巻線毎に電氣的絶縁を施して巻いてある。インダクタ L_B には四巻線インダクタの一巻線のみを使用している。

Fig. 4 に電子チョークの入力インピーダンス Z_n 特性測定回路を示す。信号周波数を f 、負荷抵抗を R_{AC} および R_L 、結合コンデンサを C_c で表している。L はブロッキングコイル、 V_n は直流電源電圧、 I_0 は R_L に流れる電流の直流分である。

Fig. 5 および Fig. 6 は Z_n の周波数特性の測定例である。Fig. 5(a) および Fig. 6(a) は、 Z_n の大きさ $|Z_n|$ を表し、Fig. 5(b) および Fig. 6(b) は、 Z_n の位相角 $\angle Z_n$ を表している。ここで、増幅器の交流電圧利得 $A = 2.0$ 、増幅器の入力インピーダンスは約 $100\text{ k}\Omega$ 、インダクタンス L_B は 1.1 mH 、インダクタンス L_M はバイファイラー巻、独立巻ともに 1.2 mH 、 $R_{AC} = 10\text{ k}\Omega$ 、 $R_L = 240\text{ }\Omega$ 、 $V_n = 24\text{ V}$ 、 I_0 は約 0.1 A である。

L_M は、Fig. 5 において、Fig. 3(a) のバイファイラー巻の巻線 1 および巻線 2 を使用している。Fig. 6 において、Fig. 3(b) の独立巻の巻線 1 および巻線 2 を使用している。二種類の巻きの巻線 1 と巻線 2 の巻数比は、1 : 1 である。どちらの場合も使用していない巻線は開放としている。 L_B 、 L_M は共に同一サイズの EI フェライトコア（幅 22 mm 、高さ 19 mm 、奥行き 5 mm 、両脚の幅 3 mm ）を用いた特注品である。 L_B に使用したインダクタの自己共振周波数は約 1 MHz 、一巻線当りの端子間容量は約 25 pF であった。 L_M に使用したインダクタでは、バイファイラー巻において、巻線 1 と巻線 2 の線間容量は約 1100 pF 、自己共振周波数から求めた一巻線あたりの端子間容量は約 60 pF であった。独立巻においては、巻線 1 と巻線 2 の線間容量は約 40 pF 、自己共振周波数から求めた一巻線あたりの端子間容量は約 200 pF であった。

Fig. 5(a) の $|Z_n|$ のグラフにおいて、二つのピークが存在する。この二つのピークの間の周波数範囲では、Fig. 5(b) のように位相角が抵抗性に近い値を持つ。通信を行う際に

は、信号の反射などシステム誤動作を招く可能性がある要因を極力排除するため、この周波数帯で通信を行うことが望ましいと考えられる⁷⁾。

Fig. 5(a) と Fig. 6(a) を比較すると、同じ増幅器でありながら異なる巻きのインダクタを L_M に用いると、 $|Z_n|$ 特性のピーク間のインピーダンスが異なる。従って、ピーク間のインピーダンスは、増幅器の入力インピーダンスがある程度以上の高い値であれば、増幅器の入力インピーダンス特性よりも二つの共振の周波数特性に大きく依存すると考えられる。

また、Fig. 5(a) の低域ピーク周波数よりも Fig. 6(a) の低域ピーク周波数のほうが高くなっていることが分かる。低域ピーク周波数は、 L_M がバイファイラー巻のときは約 120 kHz 、独立巻のときは約 180 kHz であった。自己共振周波数は、バイファイラー巻が約 600 kHz 、独立巻が約 330 kHz であった。低域ピーク周波数と自己共振周波数とで、高低が逆転していることが分かる。低域ピーク周波数が、 L_M のインダクタンスならびに線間容量および端子間容量から決まるものと仮定すると、低域ピーク周波数とインダクタンスから求めた等価的な共振容量の内訳を、バイファイラー巻、独立巻どちらの場合も線間容量の約 1 倍と端子間容量の約 3 倍の和になると推測すれば、上述の逆転現象を説明できる。

高域のピークについては、Fig. 5(a) ではピークが生じ、Fig. 6(a) では生じていないように見える。これは、Fig. 5(a) と Fig. 6(a) の高域ピークにおけるインピーダンスの大きさがほぼ同じと仮定すると、Fig. 6(a) では、ピーク周波数間の平坦部におけるインピーダンスが、高域ピークにおけるインピーダンスの値に比べて高くなっているためと思われる。

Fig. 2 Basic circuit of the new electronic choke.

Fig. 3 Composition of four windings.

Fig. 4 Experimental circuit.

(a) Measured data for the absolute value $|Z_{in}|$

(b) Measured data for the phase angle $\angle Z_{in}$

Fig. 5 Frequency characteristics of the input impedance Z_{in} in the new electronic choke with L_M having one set bi-filer windings.

(a) Measured data for the absolute value $|Z_{in}|$

(b) Measured data for the phase angle $\angle Z_{in}$

Fig. 6 Frequency characteristics of the input impedance Z_{in} in the new electronic choke with L_M having two independent windings.

(a) Measured data for the absolute value $|Z_{in}|$

(b) Measured data for the phase angle $\angle Z_{in}$

Fig. 7 Frequency characteristics of the input impedance Z_{in} in the new electronic choke with L_M having two sets bi-filer windings.

(a) Measured data for the absolute value $|Z_{in}|$

(b) Measured data for the phase angle $\angle Z_{in}$

Fig. 8 Frequency characteristics of input impedance Z_{in} in new electronic choke with L_M having four independent windings.

4. L_M に四巻線インダクタを使用した場合の入力インピーダンス特性

通信周波数帯域を広げるために、低域ピーク周波数を下げること考える。これを実現するための一方法として、二巻線だけ使用していたインダクタ L_M を、四巻線すべて使用することにした。ここで、四巻線の巻数比は 1:1:1:1 である。四つある巻線の内、二つを直列接続し、それを一つの巻線と考えることで L_M を構成した。インダクタ L_B に関しては、3 章と同様に一卷線のみを使用した。実験回路は、Fig. 4 と同様である。Fig. 7 および Fig. 8 に、 L_M として四巻線インダクタを用いたときの、 Z_{in} の周波数特性の測定例を示す。

Fig. 7 においては、Fig. 3(a)の構造図に示した二組ある

バイファイラー巻の組同士を直列接続、つまり巻線 1 と巻線 2 を、巻線 3 と巻線 4 をそれぞれ直列接続し、それぞれを一つの巻線と考えることで L_M を構成した。二巻線を直列接続したことで、インダクタンスが増大し、低域ピーク周波数が Fig. 5(a)と比較して低くなった。また、 $|Z_{in}|$ の周波数特性に、大きな共振が三つ生じている。低域ピーク周波数と 800 kHz 付近にあるピーク間の帯域では、インピーダンスの大きさが高く、位相角も抵抗性に極めて近い値を示している。

Fig. 8 において、 L_M の巻線構成は、Fig. 3(b)の巻線 1 と巻線 2、巻線 3 と巻線 4 をそれぞれ直列接続し、それぞれを一つの巻線とみなしている。Fig. 7(a)と Fig. 8(a)を比較すると、低域ピーク周波数には、それほど大きな差は見られなかった。

5. むすび

電子チョークの入力インピーダンス特性について、今回は、インピーダンスの大きさ $|Z_n|$ の周波数特性に見られる低域ピーク周波数が何によって決まるのかを解明することを主な目的として、 L_M に異なる巻き方の二種類のインダクタを用いた実験により、検討を行った。

その結果、バイファイラー巻と独立巻について調べた今回の実験範囲内において、 L_M に二巻線インダクタを用いた場合、 $|Z_n|$ 特性の低域ピーク周波数は、インダクタンスならびに線間容量の約1倍と端子間容量の約3倍の和に等しい静電容量とで決まる、と推測できることが分かった。

今後は、バイファイラー巻、独立巻以外の巻線構造を持つインダクタについても、低域ピーク周波数が同様に決まるかを検討する必要がある。

更に、バイファイラー巻の接続方法を変えたときに $|Z_n|$ の周波数特性に現れる三つの大きなピークについても説明がつくように、従来の解析を改良し、改めて報告したい。

References

- 1) For example, P. H. Sutterlin, W. R. Bemiss, and G. M. Hey: *United States Patent*, 5148144 (1992).
- 2) A. Katsuki, M. Matsushima, and N. Takimoto: *Proc. 21st International Telecommunications Energy Conference*, Copenhagen, 1999, Paper No. 13-1 (IEEE, Piscataway, 1999).
- 3) For example, H. Ott and H. Zierhut: *European Patent*, 365696B1 (1995).
- 4) S. Nojima, N. Ooba, K. Yamamoto, and K. Ooe: *Japanese Patent*, 2079176 (1995). (in Japanese)
- 5) A. Katsuki and T. Matsumoto: *Record of 2002 Joint Conference of Electrical and Electronics Engineers in Kyushu*, Nagasaki, 2002, No. 1038 (Joint Chapter in Kyushu from IEE of Japan and others, Fukuoka, 2002). (in Japanese)
- 6) A. Katsuki, T. Matsumoto, T. Eto and Y. Hashimoto: *Proc. 25th International Telecommunications Energy Conference*, Yokohama, 2003, p. 615 (IEEE, Piscataway, 2003).
- 7) A. Katsuki and T. Matsumoto: *Journal of the Magnetics Society of Japan*, 2004, No. 4, Vol. 28.
- 8) A. Katsuki, S. Ogura, and M. Matsushima: *Proc. 4th International Power Electronics Conference*, Tokyo, 2000, p. 108 (IEE of Japan, Tokyo, 2000).
- 9) A. Katsuki and M. Matsushima: *Proc. 22nd International Telecommunications Energy Conference*, Phoenix, 2000, p. 741 (IEEE, Piscataway, 2000).

2004年10月6日受理, 2004年12月14日採録