有線通信システム用端末に内蔵する新しい電子チョークの交流電圧減衰特性

AC Voltage Attenuation Characteristics of a New Electronic Choke Used in the Terminal of a Wire Communication System

甲木昭彦・松本正

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

A. Katsuki and T. Matsumoto

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

In most wire communication systems, communication lines are also used as power lines. Therefore, the powered terminal needs to separate ac communication signals and dc supply power in its input part connected to the communication lines. Well-known separators usually utilize a combined circuit of inductors (or transformers) and capacitors. When the lowest frequency of the signal is low, the inductance becomes high and the size of the inductor increases. A conventional electronic choke circuit with no inductor has the disadvantages that power dissipation is high and the dc current is limited to unidirectional flow. Our original communication system consists of low-power dc-dc converters. Because a converter in the powering terminal operates not only as power supply but also as transmitter, it is preferable that the electronic choke be bidirectional. In this paper, the ac voltage attenuation characteristics of a new low-loss electronic choke with small inductors and an amplifier are investigated by experiment and analysis.

Key words: choke coil, electronic choke, inductor, power supply, powering terminal, powered terminal, transformer, transmitter, wire communication system

1. まえがき

有線通信システムにおいては、通常、通信線が電源供給線としても用いられる¹⁾。従来のシステムでは、Fig. 1に示すように、端末で消費する全ての電力を主電源から供給する。例えば、主電源が故障した場合や保守作業のために主電源を動作停止させた場合、システム全体がダウンする。予め端末の台数を想定して主電源の電力容量を決める必要があり、しかも端末増設時にはシステムダウンを避けるため更に大きな容量の電源と交換しなければならない場合も起こり得る。従って、信頼度およびアベイラビリティが低く、保守作業を行い難い。

このような欠点を解決するために、筆者らは、Fig. 2に示すような新しい有線通信システムを提案した²⁾。通信線に電源供給を行う給電端末 (Powering terminal) に小容量の電源装置を搭載し、これらを並列接続して給電システムを構成する。これに対し、通信線から電源供給を受ける受電端末 (Powered terminal) が、並列接続された直流負荷となる。システム全体の電源容量について供給電力の合計を全消費電力よりも大きく選んで余裕を持たせると、並列冗長システムを実現できる。少数の給電端末が故障してもシステムダウンに繋がらず、保守作業も端末を順次動作停止させればシステムとしては連続運用可能である。端末

Fig. 1 Conventional wire communication system.

Fig. 2 Proposed wire communication system.

を増設する場合は、受電端末の数が増えると共に給電端末の数を増やせば、電力不足によるシステムダウンの心配が無い。

給電端末および受電端末の具体的な構成例および動作説明については、付録を参照されたい。現在は電源装置にスイッチング電源を採用することが多いので、直流出力電圧に含まれるリプル電圧を逆に利用することもできる。すなわち、信号送信時にだけ、本来は好ましくないリプル電圧を意図的に大きくして搬送波とし、これに変調を施すと、容易に送信器を実現できる²⁾⁻⁴⁾。信号受信時には、通常の電源と同様に低リプル状態で動作させる。このように、送信機能を持つ電源と受信器を組み合わせることで、給電端末を構成することができる。

従来のシステムでは、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が、特に重要である。出力電力が大きな電源は、直流出力端子側すなわち通信線側にリプルやノイズを抑制するための大容量コンデンサや高周波特性に優れたコンデンサが接続されており、通信信号に対して極めて低いインピーダンスを示す。そこで、主電源と通信線との間にチョークコイルが挿入される⁵⁾。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、大型のコイルが必要になる。そこで、コイルを除去することを目的として、能動状態にあるバイポーラトランジスタの出力インピーダンスが高くなることを利用した電子チョーク回路⁶⁾が、考案された。この回路には、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するという欠点がある。更に、直流電流の向きが一方に制限される。

ところで、すべての端末は通信線に並列接続される。従って、端末数を多くしたい場合は、通信線から各端末側を見た通信信号に対するインピーダンスが高いことが必要である。使用可能な端末の台数は、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制限されるものと推測できる。なお、通信線から主電源側、換言すればチョークコイルあるいは電子チョーク回路側を見たインピーダンスも、この条件に含まれる。電子チョーク回路は、端末の入力回路としても有用である。但し、主電源とは直流電流の向きが逆になるため、トランジスタの極性を変更することが必要となる。

新方式有線通信システムでは、直流電流の向きが双方向性の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使うことができ、便利である。更に、主電源を除去したため電子チョークを流れる直流電流は小さく、直流電圧調整は複数の出力電圧が必要な場合も想定されるので別に回路を設けて行うほうが合理的である。これらを考慮に入れて、小型のコイルと増幅器を組み合わせることによって、電力損が少ない、新しい電子チョークを提案した⁷⁾。本論文では、その交流電圧減衰特性を実験と解析によって詳細に検討する。

2. 電子チョーク回路

新しい電子チョークの基本回路を Fig. 3 に示す。提案したシステムにおいては、二通りの使い方をする。一つは、端子 1-1'間に直流電源電圧と交流信号電圧を重畳して印加し、端子 2-2'間から直流電源電圧を、端子 3-3'間から交流信号電圧を、分離して取り出す方法である。これは、送信状態にある給電端末、送信状態および受信状態にある受電端末で用いられる。もう一つは、端子 2-2'間から直流電源電圧を印加して端子 1-1'間から取り出し、同時に端子 1-1'間から交流信号電圧を印加して端子 3-3'間から取り出す方法である。これは、受信状態にある給電端末で用いられる。

直流電流は端子 1-2 間を通過できる。直流巻線抵抗を低くすれば、電圧降下、従って直流による電力損を少なくできる。交流信号に対する回路動作の概略は、次の通りである。例えば、二巻線インダクタ L_M の巻数比が 1:1 で密結合とし、増幅器の交流電圧利得 A が 2 であると仮定する。交流信号に対してコンデンサ C_1 , C_2 , および C_3 が十分低いインピーダンスを示すものとする。端子 1-1'間に印加された交流信号電圧は、ブートストラップ効果によって一巻線インダクタ L_B の端子間には現れない。理想的には、 L_B に交流電流が流れないので、端子 1-1'から右を見た入力インピーダンス Z_{in} は増幅器の入力インピーダンスによって決まる。

参考のため、 Z_{in} の測定データ例を Fig. 4 に示す。Fig. 4(a)は実験回路である。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。 V_{in} 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. 4(b) および Fig. 4(c)は、それぞれ Z_{in} の大きさ $|Z_{in}|$ および位相角 $\angle Z_{in}$ の周波数特性である。 $|Z_{in}|$ のグラフに見られる二つのピーク間の周波数帯では、 $|Z_{in}|$ がほぼ一定で $\angle Z_{in}$ が 0 に近いことが分かる。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。

電源供給を伴う有線通信システムの代表的な例として、有線電話が挙げられる。利用者が電話機等の端末を接続す

1-1': DC input or output, and AC input
2-2': DC output or input
3-3': AC output

Fig. 3 Basic circuit of the new electronic choke.

る通信線での最高信号周波数が数 kHz であることから、提案回路は桁違いに高い周波数でも使用できることが分かる。著者は、本システムに相応しい用途として、例えば設備系機器の制御などを想定している。低価格で施工しやすい通信ケーブルを使いながら雑音妨害や波形の歪みなどの影響による誤動作を起こし難いシステムを構築するためには、通信信号周波数を必要以上に高くしないことも重要であると考えられる。なお、要求される帯域幅は、通信信号波形に大きく依存する。従って、通信方式や多重化の有無などの条件に合わせて、回路設計を行う必要がある。

(a) Experimental circuit

(b) Measured data of absolute value $|Z_{in}|$

(c) Measured data of phase angle $\angle Z_{in}$

Fig. 4 Frequency characteristics of the input impedance Z_{in} .

3. 交流電圧減衰特性

3.1 端子 1-1' から端子 2-2' までの減衰特性

Fig. 5(a)に、端子 1-1' から端子 2-2' までの交流電圧減衰特性を調べる実験回路を示す。端子 1-1' 間に交流電圧 v_{in} と直流電圧 V_{in} とを重畳して印加する。増幅された交流電圧を端子 3-3' 間から負荷 R_{AC} に取り出すことができるが、端子 2-2' に接続された負荷 R_L には直流電圧 V_{out} の他に僅かではあるが交流電圧 v_{out} が現れる。Fig. 5(b)に v_{out}/v_{in} の大きさに関する測定データを示す。

Fig. 5(b)に、同特性の計算結果を併せて記載した。解析に当たり、Fig. 6 に示す等価回路を用いた。増幅器の入力インピーダンスおよび出力インピーダンスを、それぞれ Z_A , Z_OA で表している。 Z_{2L} および Z_3 は負荷インピーダンス、 Z_{oS} は信号源インピーダンス、 V_S は信号源電圧である。インダクタ L_B , L_M , およびコンデンサ C_2 の等価回路については、後述する。電圧利得 V_2/V_1 は、次式のように求められる。

$$\frac{V_2}{V_1} = \left(1 + \frac{Z_{M1} - Z_B}{Z_P} \right) \frac{Z_2}{2Z_{M1} + Z_{M2} + Z_2} \quad (1)$$

ここで

$$Z_P = \frac{2K}{2K \left(1 + \frac{Z_{3oA} + Z_{M3} + Z_{M2} + Z_2}{4Z_{M1}} \right) - A} \left\{ Z_B + \left(1 + \frac{Z_B}{Z_{M1}} \right) \frac{Z_{3oA} + Z_{M3} + Z_{M2} + Z_2}{4} + \frac{(Z_{3oA} + Z_{M3})(Z_{M2} + Z_2)}{4Z_{M1}} \right\} \quad (2)$$

$$Z_2 = \frac{Z_{2C}Z_{2L}}{Z_{2C} + Z_{2L}} \quad (3)$$

$$Z_{3oA} = \frac{Z_{oA}Z_3}{Z_{oA} + Z_3} \quad (4)$$

$$K = \frac{1 + \frac{Z_{oA}}{Z_3}}{1 + \frac{Z_{M2} + Z_2}{2Z_{M1}}} \quad (5)$$

測定結果と計算結果を比較すると、良く一致していることが分かる。新しい電子チョークでは、 L_M によって交流電圧が強制的に打ち消されるため、減衰効果が優れている。なお、 v_{out}/v_{in} または V_2/V_1 の大きさを Fig. 5(b)に記載する際には、デシベル表示 G_v を用いた。

3.2 端子 2-2' から端子 1-1' までの減衰特性

Fig. 7(a)に示すように、端子 2-2'間から直流電圧 V_{in} を印加する場合について調べる。ここでは、交流電圧 v_{in} は、通信信号ではなく通常の直流電源電圧に含まれるリプルやノイズを意味しており、元々十分小さな値に抑えられているため特に減衰させる必要がある訳ではない。しかし、給電端末が並列接続された電源を構成することから、高入力インピーダンス特性と相俟ってリプルの還流抑制等の効果を期待できる。

Fig. 7(b)に、端子 2-2' から端子 1-1'までの交流電圧減衰特性を示す。Fig. 8 は、解析のための等価回路であり、端子 2-2'間に信号源が接続されている点および端子 1-1'間に

インピーダンスが Z_{IL} の負荷が接続されている点とが Fig. 6 とは異なっている。

電圧利得 V_1/V_2 は、次式のように求められる。

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{1+H}{J} \quad (6)$$

ここで

$$H = \frac{Z_{M3} - Z_{M2} + Z_{3oA}}{2Z_{M1}} \cdot \frac{1}{1 + \frac{Z_{M2}}{2Z_{M1}}} \quad (7)$$

(a) Experimental circuit

(b) Measured data and calculated values

Fig. 5 AC component reduction ratio from 1-1' to 2-2'.

Fig. 6 Equivalent circuit for calculation of the ac component reduction ratio from 1-1' to 2-2'.

$$J = \left(\frac{1}{Z_{1L}} + \frac{1}{Z_{1A}} \right) \left\{ (2+H)Z_B + \frac{1 + \frac{Z_{M3} + Z_{30A}}{Z_{M1}}}{2 \left(1 + \frac{Z_{M2}}{2Z_{M1}} \right)} Z_{M2} \right\} + 2 + H - \frac{A}{1 + \frac{Z_{0A}}{Z_3}} \quad (8)$$

なお、Fig. 5(b)および Fig. 7(b)に示した計算結果のグラフを描くに際し、 L_B 、 L_M 、および C_2 の等価回路として Fig. 9 に記載の Z_B 、 Z_{M1} 、 Z_{M2} 、 Z_{M3} 、および Z_{2C} を用いた。増幅器については、電圧利得 A を一次遅れ特性で近似し、直流電

圧利得を $|A|_{DC}$ 、高域遮断周波数を f_{hc} で表した。 L_B および L_M には、同一サイズのフェライト磁心(幅 22 mm、高さ 18 mm、奥行き 5 mm、および両脚の幅 3 mm の EI 磁心)を用いて実験した。解析および実験に当たり、使用したパラメータの値は次の通りである。

$L_B = 1.1$ mH, $C_B = 26$ pF, $R_B = 15$ k Ω , $r_B = 2.6$ Ω , $L_M = 1.2$ mH, $C_M = 1000$ pF, $R_M = 10$ k Ω , $r_{M2} = r_{M3} = 3.1$ Ω , $L_{M2} = L_{M3} = 2.0$ μ H, $ESL = 0.013$ μ H, $ESR = 0.1$ Ω , $C_2 = 1.0$ μ F, $Z_{1L} = Z_{2L} = R_L = 240$ Ω , $Z_{1A} = 100$ k Ω , $Z_{0A} = 110$ Ω , $Z_3 = 10$ k Ω , $|A|_{DC} = 2.0$, $f_{hc} = 10$ MHz, $I_0 = 0.1$ A.

Fig. 7 AC component reduction ratio from 2-2' to 1-1'.

Fig. 8 Equivalent circuit for calculation of the ac component reduction ratio from 2-2' to 1-1'.

Fig. 9 Equivalent circuits of Z_B , Z_{M1} , Z_{M2} , Z_{M3} , and Z_{2C} .

4. むすび

新しい電子チョークについて、交流電圧減衰特性を調べた。その結果、実験により、優れた減衰特性が得られることが分かった。この回路は、通常の低域通過フィルタとは異なって、二巻線インダクタを用いて交流電圧の打ち消し回路を構成した点に特徴がある。小さなインダクタンスと静電容量とで、交流電圧を十分に減衰させることができた。二巻線インダクタは、一巻線インダクタにブートストラップを掛ける動作にも関与しており、電子チョークの高入力インピーダンス化にも大いに貢献している。更に、等価回路を用いて減衰率を解析し、測定結果と計算結果とが良好に一致することを確認した。

この電子チョークは、従来の有線通信システムでも使用可能である。通信信号波形が磁心飽和の生じるような極端に大きな直流成分を持たなければ、デジタル通信かアナログ通信かを含めて、周波数変調 (FM)、振幅変調 (AM)

Fig. A1 Operation of powering terminals.

など、方式の種類に依らず対応できると考えられる。時分割多重あるいは周波数多重通信などへの応用については、現在検討中である。今後は、まず電子チョークの入力インピーダンス特性を詳細に解析し、信号減衰特性と併せて、通信信号波形や周波数スペクトルなどを考慮に入れた最適設計を行いたい。

文 献

- 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) A. Katsuki, S. Ogura, and M. Matsushima: *Proc. 4th International Power Electronics Conference*, Tokyo, 2000, p. 108 (IEE of Japan, Tokyo, 2000).
- 4) A. Katsuki and M. Matsushima: *Proc. 22nd International Telecommunications Energy Conference*, Phoenix, 2000, p. 741 (IEEE, Piscataway, 2000).
- 5) For example, H. Ott and H. Zierhut: *European Patent*, 365696B1 (1995).
- 6) S. Nojima, N. Ooba, K. Yamamoto, and K. Ooe: *Japanese Patent*, 2079176 (1995). (in Japanese)
- 7) 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)

2003 年 10 月 21 日受理, 2004 年 1 月 15 日採録

付録. 給電端末および受電端末の動作

給電端末の動作説明図を Fig. A1 に示す。電源を商用交流から得る場合は、停電対策として無停電電源 (UPS) を内蔵させることが望ましい。スイッチにおいて、“T”は送信を、“R”は受信を表す。“DC”または“AC”と書かれた矢印は、それぞれ直流電源電流の向き、交流通信信号伝達の向きを示す。この図の場合は、信号送信の変調方式として、FM を採用している。DC-DC コンバータのスイッチング周波数 f_s を変調信号に応じて変化させており、デジタル FM、アナログ FM のいずれも可能である。次に、Fig. A2 は、受電端末の動作説明図である。

待機状態では、全ての端末は受信状態となり通信信号を待っている。通信を行う際には、一つの端末が送信状態、他の端末は受信状態のままである。制御器はこのような切替等を行う。送信状態の端末は、送信中の信号をその端末の受信器で監視できる。

Fig. A2 Operation of powered terminals.