ハイブリッド形イミタンス変換器

正 員 入江 寿一 (大阪電気通信大学)
 学生員 川端 祐一 (大阪電気通信大学)

Hybrid Type Immittance Converter

Hisaichi Irie, Member & Yuichi Kawabata, Student Member
 (Osaka Electro-Communication University)

Abstract : The immittance converter has an input impedance that is proportional to the admittance of a load connected across output terminals. Therefore, in this converter, the output current is proportional to the input voltage and the input current is proportional to the output voltage. Consequently, it converts a constant voltage source into a constant current source and a constant current source into a constant voltage source.

It is well known that the quarter-wavelength transmission line shows immittance conversion characteristics. However, it has very long line length for the switching frequency of converters and is not suitable for power electronics application. So we proposed five types of immittance converters that consist of lumped elements L, C and showed improved immittance conversion characteristics at a resonant frequency.

The output characteristics and efficiency characteristics of an immittance converter is the most important parameter when it is used in practical applications in a high frequency link. In this paper we show voltage-current transformation characteristics, current-voltage transformation characteristics and efficiency characteristics of a Hybrid type immittance converter which consist of L, C elements with losses. The excellent characteristics were confirmed analytically and experimentally.

キーワード : イミタンス変換器, 特性インピーダンス, 定電圧, 定電流, 効率

1. まえがき

イミタンス変換器とは、インピーダンス・アドミタンス変換器の略称であり、入力端から見たインピーダンスが出力端に接続された負荷のアドミタンスに比例するものをいう。通信分野ではジャイレータ⁽¹⁾とも呼ばれる。ジャイレータは主に伝送回路では方向性移相器として使用され、電力変換器としての特性は問題にされていない。

共振形イミタンス変換器は共振周波数で使用すると、入力電圧と出力電流が比例し、入力電流と出力電圧が比例するイミタンス変換特性を示す。

イミタンス変換器の入力端に高周波電源、出力端に負荷を接続して負荷側から見ると、高周波定電圧源は定電流源に、定電流源は定電圧源に見える。したがって、パワーエレクトロニクス装置の高周波リンク部に挿入し、電圧源を電流源に、電流源を電圧源に変換するのに適していると考えられる⁽⁹⁾⁽¹⁰⁾。

著者らは先に電力変換器として5種類の集中定数共振形イミタンス変換器を提案⁽²⁾し、その形からT-LCL形, π -CLC

形等と呼ぶことにした。また、無損失での5種類のイミタンス変換器の周波数特性および基本特性を示した。特にT-LCL形, π -CLC形はパワーエレクトロニクス装置の高周波リンク部に挿入して、電力変換を行うのに適すると考えられ、試作回路では効率98.7%を得ている⁽⁶⁾。

本論文では、5種類の共振形イミタンス変換器のうちハイブリッド形イミタンス変換器をとり上げ、電圧-電流変換特性、電流-電圧変換特性および効率特性を明らかにし、実験結果を示す。

2. イミタンス変換器

図1 4端子イミタンス変換器

Fig.1 Four-terminals circuit.

イミタンス変換器は図1に示すように4端子回路で表すと

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \pm jZ_0 \\ \pm j\frac{1}{Z_0} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(1)$$

で定義される。

式(1)より入力電圧と出力電流が比例し、入力電流と出力電圧が比例する。

$$\begin{cases} \dot{V}_1 = \pm jZ_0 \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 = \pm j\frac{1}{Z_0} \dot{V}_2 \end{cases} \quad \dots\dots\dots(2)$$

負荷インピーダンス $\dot{Z}_2$ を用いて入力インピーダンス $\dot{Z}_1$ を表すと式(3)になり、負荷のアドミタンスに比例する。

$$\dot{Z}_1 = \frac{\dot{V}_1}{\dot{I}_1} = \frac{Z_0^2}{\dot{Z}_2} \quad \dots\dots\dots(3)$$

ただし、 Z_0 ：特性インピーダンス

式(2)を特性図で示すと図2のように示すことができる。定電圧入力の場合、それぞれの入力に対してもそれに応じた定電流出力となる。定電流入力の場合も同様に、それぞれの入力に対して定電圧出力となる。

図2 イミタンス変換器出力特性

Fig.2 Output characteristics of immittance converter.

L と C の集中定数受動素子で構成されたイミタンス変換

図3 共振形イミタンス変換器の回路構成

Fig.3 Resonant immittance converters.

器は図3に示すように5種類が考えられる。T-LCL形、 π -CLC形はローパスフィルタの構成をしており、方形波入力に応用に適する。ハイブリッド形はブリッジ構成である。

3. ハイブリッド形イミタンス変換器の特性

<3・1>4端子定数

ハイブリッド形イミタンス変換器の回路を図4に示す。

図4 ハイブリッド形イミタンス変換器

Fig.4 Hybrid type immittance converter.

図4のように、 C は無損失と仮定し、 L_1 、 L_2 の損失を直列抵抗 r_1 、 r_2 で表し、 $L = L_1 = L_2$ 、 $C = C_1 = C_2$ 、 $r_1 \neq r_2$ とすれば4端子定数は式(4)で表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{E} \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(4)$$

ただし、

$$\begin{aligned} A &= -\left(\omega^2 L^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right) + r_1 r_2 + 2\frac{L}{C} + j(r_1 + r_2)\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \\ B &= \frac{1}{j\omega C} \left\{ 2r_1 r_2 - 2\left(\omega^2 L^2 - \frac{L}{C}\right) + j(r_1 + r_2)\left(2\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \right\} \\ C &= r_1 + r_2 + j2\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \\ D &= -\left(\omega^2 L^2 + \frac{1}{\omega^2 C^2}\right) + r_1 r_2 + 2\frac{L}{C} + j(r_1 + r_2)\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \\ E &= \left(\omega^2 L^2 - \frac{1}{\omega^2 C^2}\right) - r_1 r_2 - j\omega L(r_1 + r_2) \end{aligned}$$

<3・2>共振周波数における特性

式(4)より共振周波数 f_r において L_1, L_2 の Q を Q_1, Q_2 とすれば特性は以下ようになる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \frac{1}{Q_1 + Q_2} & jZ_0 \\ j \frac{1}{Z_0} & j \frac{1}{Q_1 + Q_2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(5)$$

ただし, $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$, $Z_0 = \sqrt{L/C}$,

$$Q_1 = 2\pi f_r L / r_1, \quad Q_2 = 2\pi f_r L / r_2$$

式(5)より特性は $Q_1 + Q_2$ の値によって決まる。したがって、リアクトル L_1, L_2 の Q が異なる場合でもその平均値 Q で特性を表現することができる。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} j \frac{1}{2Q} & jZ_0 \\ j \frac{1}{Z_0} & j \frac{1}{2Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(6)$$

ただし, $Q = (Q_1 + Q_2)/2$ となる。

(i) 入出力特性

式(6)で $Q = \infty$ のとき $\dot{A} = \dot{D} = 0$ となり、イミタンス変換器の理想特性式となる。出力端に負荷インピーダンス Z_2 を接続すると、 $\dot{V}_1, \dot{I}_1$ は次のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_1 &= jZ_0 \left(1 + \frac{1}{2Q} \cdot \frac{Z_2}{Z_0} \right) \dot{I}_2 \\ \dot{I}_1 &= j \frac{1}{Z_0} \left(1 + \frac{1}{2Q} \cdot \frac{Z_0}{Z_2} \right) \dot{V}_2 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(7)$$

式(7)から二項定理を用いて、 I_2, V_2 を近似すると

$$\left. \begin{aligned} I_2 &\cong \frac{V_1}{Z_0} - \frac{1}{2Q} \cdot \frac{V_2}{Z_0} \\ V_2 &\cong I_1 Z_0 - \frac{1}{2Q} I_2 Z_0 \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots(8)$$

式(8)になり、出力電流と出力電圧は理想部分（第一項）と損失部分（第二項）に分けて考えることができる。

(ii) 効率特性

出力端に負荷インピーダンス Z_2 を接続したときの効率 η は以下の式になる。

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{1}{Q} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\sqrt{\frac{Z_2}{Z_0}} - \sqrt{\frac{Z_0}{Z_2}} \right)^2 \right\}} \quad \dots\dots\dots(9)$$

最大効率 $\eta_{\max}$ は $Z_2 = Z_0$ のときに現れ、以下のように近似できる。

$$\eta_{\max} \cong 1 - \frac{1}{Q} \quad \dots\dots\dots(10)$$

T-LCL形, π -CLC形イミタンス変換器の最大効率⁽⁵⁾が

$$\eta_{\max} \cong 1 - \frac{2}{Q} \quad \dots\dots\dots(11)$$

であるのと比較して、ハイブリッド形イミタンス変換器の効率は高い。

図5は負荷インピーダンスに対するハイブリッド形イミタンス変換器の効率特性を示し、リアクトルの Q の平均値が100のとき最大効率は99%、平均値が150のとき最大効率は99.3%となる。

図5 効率特性

Fig.5 Efficiency characteristics.

<3・3>周波数特性

図4より $r_1 = r_2 = 0$ とし、 L, C を理想素子としたとき式(4)は

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_1 \\ \dot{I}_1 \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + \omega^2 LC} \begin{bmatrix} 1 - \omega^2 LC & j2\omega L \\ j2\omega C & 1 - \omega^2 LC \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_2 \\ \dot{I}_2 \end{bmatrix} \quad \dots\dots\dots(12)$$

となる。出力端に純抵抗を接続したときの周波数特性は図6のようにになる。

図6 周波数特性

Fig.6 Frequency characteristics.

図6(a)は定電圧入力の場合の出力電流の振幅 I_2 を示し、(b)は定電流入力の場合の出力電圧の振幅 V_2 を示している。矢印の方向は負荷インピーダンスの増加を示し、パラメータは $Z_2/Z_0 = 0.01, 0.2, 0.4, \dots, 1.0, \dots, 2.0$ まで0.2きざみと

し、 $Z_2/Z_0=1$ の時を太線で示している。ハイブリッド形イミタンス変換器は定電圧入力および定電流入力ともに全域通過の特性を示す。共振周波数 $f/f_r=1$ において、定電圧入力の際には負荷インピーダンスの増減にかかわらず出力電流は一定となり、定電流入力の際には負荷インピーダンスに関係なく出力電圧は一定となる。

<3・4>ベクトル

図4において、 L 、 C の素子にかかる電圧を $\dot{V}_L$ 、 $\dot{V}_C$ 、流れる電流を $\dot{I}_L$ 、 $\dot{I}_C$ とすると次のような関係式が成立する。

$$\left. \begin{aligned} \dot{V}_1 &= \dot{V}_L + \dot{V}_C \\ \dot{V}_2 &= \dot{V}_C - \dot{V}_L \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_L + \dot{I}_C \\ \dot{I}_2 &= \dot{I}_L - \dot{I}_C \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots(13)$$

式(13)より入力電流と出力電流はリアクトルとコンデンサに流れる電流の和で表すことができ、入力電圧と出力電圧をリアクトルとコンデンサにかかる電圧の和で表すことができる。

共振周波数のもとで負荷力率が1のときの定電圧入力におけるベクトルは図7となる。

図7 ベクトル図(定電圧入力)

Fig.7 Phasor diagrams.(Constant voltage input)

図中の番号は① $Z_2=Z_0$ 、② $Z_2=2Z_0$ 、③ $Z_2=4Z_0$ である。入力電流と出力電圧の大きさは、負荷インピーダンスの大きさに比例し2倍、4倍となる。

入力電圧が一定であれば、負荷インピーダンスの大きさに関わらず、出力電流は一定である。出力電圧の大きさは入力電流に比例し、その位相差は $\pi/2$ である。

負荷インピーダンスが増加するにつれて入力電流が増加し、リアクトルとコンデンサに流れる電流の位相は入力電流の位相に近づいていく。

共振周波数のもとで負荷力率が1のときの定電流入力におけるベクトルは図8となる。

図8 ベクトル図(定電流入力)

Fig.8 Phasor diagrams.(Constant current input)

図中の番号は① $Z_2=0.5Z_0$ 、② $Z_2=Z_0$ 、③ $Z_2=2Z_0$ である。入力が一定電流のときには、負荷インピーダンスが増加するに従い入力電圧と出力電流は負荷インピーダンスの大きさに反比例し小さくなる。入力電流が一定であれば出力電圧は負荷インピーダンスの大きさに関係なく一定となる。

負荷インピーダンスが減少するにつれて入力電圧が増加し、リアクトルとコンデンサにかかる電圧の位相は入力電圧の位相に近づいていく。

図7と図8より、入力電流および出力電流のほぼ半分は L より損失の少ない C を通して流れるので、高い効率を持つと考えられる。

4. 実験結果

ハイブリッド形イミタンス変換器を試作して特性を測定した。試作回路の諸定数を表1に示す。共振周波数 f_r と特性インピーダンス Z_0 はリアクトル L とコンデンサ C の平均値から求めている。使用したリアクトルはフェライトコアにリッツ線を巻いたもので、コンデンサはメタライズドポリプロピレンフィルムコンデンサを使用している。

表1 実験回路の諸定数

Table.1 Parameters of experimental circuit.

共振周波数 f_r [kHz]	14.97	
リアクトル L [μ H]	$L_1=212.0$	$L_2=213.4$
Q	$Q_1=151.5$	$Q_2=130.5$
損失抵抗 r [Ω]	$r_1=0.13$	$r_2=0.15$
コンデンサ C [μ F]	$C_1=0.532$	$C_2=0.529$
特性インピーダンス Z_0 [Ω]	20.02	

<4・1>定電圧入力特性

試作した回路に共振周波数で正弦波の一定電圧 20Vを入力したときの入出力特性を図9に、効率特性を図10に示す。

図9 入出力特性 (定電圧入力)

Fig.9 Characteristics for constant voltage input.

図9において実線は計算値を示している。一定電圧 20V を入力したときは負荷インピーダンスを変化しても出力電流は 1A 一定となっている。入力電圧と出力電流が比例し、入力電流と出力電圧が比例している。負荷インピーダンスを 0 から特性インピーダンスの 3 倍の 60 Ω まで変化したときの出力電流の変動率は、測定値が 1.31%，計算値は 1.10% である。なお比較のために測定した T-LCL 形の変動率は 2.29% であった。

図10 効率特性 (定電圧入力)

Fig.10 Efficiency characteristics for constant voltage input.

図10の定電圧入力での効率特性より、負荷インピーダンスが 8 Ω から 40 Ω の間で効率は 99% 以上となり、負荷インピーダンスが 20.01 Ω のとき最大効率 99.4% が得られ、計算値 99.3% と近い値になっている。負荷インピーダンスが特性インピーダンスとほぼ一致する時、最大効率を得られることが確認できる。なお T-LCL 形の最大効率の測定値は 98.7% で

あった。

< 4・2 > 定電流入力特性

正弦波の一定電流 1A を入力したときの入出力特性を図 11 に効率特性を図 12 に示す。

図11 入出力特性 (定電流入力)

Fig.11 Characteristics for constant current input.

一定電流 1A を入力したとき、負荷インピーダンスを変化しても出力電圧は 20V 一定となっている。入力電流と出力電圧が比例し、入力電圧と出力電流が比例している。出力電流を 0 から 2A まで変化させたときの出力電圧の変動率は、測定値が 0.62%，計算値は 0.56% である。

図12 効率特性 (定電流入力)

Fig.12 Efficiency characteristics for constant current input.

図12の定電流入力での効率特性より、負荷インピーダンスが 12 Ω から 56 Ω の間で効率は 99% 以上となった。負荷インピーダンスが 20.08 Ω のとき最大効率 99.3% が得られ、計

算値 99.3%と一致している。定電流入力のときも負荷インピーダンスが特性インピーダンスとほぼ一致する時、最大効率が得られる。

5. むすび

ハイブリッド形イミタンス変換器の入力電流および出力電流はリアクトルとコンデンサに流れる電流の和であり、コンデンサはリアクトルに比べて損失が少ないので、他の形式のイミタンス変換器より効率が低い。リアクトルの Q の平均値が 100 のとき最大効率は 99%, 平均値が 150 のとき最大効率は 99.3%となる。実験では定電圧入力、定電流入力ともに負荷インピーダンスと特性インピーダンスが一致するときに最大効率は 99.3%以上が得られ、他の形式の変換器より変換効率は高いことが確認できた。

ハイブリッド形イミタンス変換器の電圧-電流特性、電流-電圧特性は他の形式のイミタンス変換器よりも理想特性に近い。周波数特性は負荷インピーダンスと特性インピーダンスが一致するとき、全域通過特性であり、高調波の存在する応用では注意が必要である。

(平成 12 年 5 月 15 日受付, 平成 12 年 9 月 11 日再受付)

参考文献

- (1)矢崎, 式部:「伝送回路網およびフィルタ」電子通信学会, p.168 (1972)
- (2)山名, 入江:「イミタンス変換器を使用した電力変換装置」, 平成 8 年電気学会全国大会, No.817 (1996)
- (3)D.Shmilovits, S.Singer:「A Converter Topology with Gyrator Characteristics」PESC'96, pp.426-430 (1996)
- (4)入江, 山名:「パワーエレクトロニクスに適するイミタンス変換器」電学論, 117-D, 8, pp.962-969 (1997)
- (5)大西, 入江, 櫻井, 山名:「イミタンスコンバータの効率特性」, 平成 10 年電気学会産業応用部門大会, No.215 (1998)
- (6)川端, 入江:「ハイブリッド形イミタンス変換器の効率特性」, 平成 11 年電気学会産業応用部門大会, T-31 (1999)
- (7)川端, 入江:「ハイブリッド形イミタンス変換器の変換特性」, 平成 11 年電気関係学会関西支部連合大会, G117 (1999)
- (8)川端, 入江:「ハイブリッド形イミタンス変換器のベクトル図」, 平成 12 年電気学会全国大会, G4-001 (2000)
- (9)入江, 高下, 木村, 江口, 日吉:「イミタンス変換器を用いた太陽光発電系統連系インバータ」電学論, 120-D, 3, pp.410-416 (2000)
- (10)入江, 南, 南, 北吉:「イミタンス変換器を用いた非接触給電装置」電学論, 120-D, 6, pp.789-794 (2000)

入江 寿一 (正員) 1937年4月21日生。1960年3月大阪

府立大学工学部電気工学科卒業。同年4月シャープ(株)入社。1964年大阪府立大学工学部電気工学科助手, 助教授。1990年4月大阪電気通信大学工学部電子機械工学科教授。DCチョッパ等半導体電力変換回路および電動機駆動, ソフトスイッチング等の研究に従事。工学博士。1995年著作賞受賞。計測自動制御学会, システム制御情報学会, パワーエレクトロニクス研究会, IEEE 会員。

川端 祐一 (学生会員) 1977年2月7日生。1999年3月

大阪電気通信大学工学部電子機械工学科卒業。同年4月, 同大学大学院工学研究科制御機械工学専攻入学。現在に至る。