三相イミタンス変換器

正員 入江 寿一 (大阪電気通信大学)

学生員 西浴 貴之 (大阪電気通信大学)

Three-Phase Immittance Converter

Hisaichi Irie, Member & Takayuki Nishisako, Student Member
(Osaka Electro-Communication University)

The immittance converter has an input impedance that is proportional to the admittance of a load connected across its output terminals. In this converter, the output current is proportional to the input voltage and the input current is proportional to the output voltage. Consequently a constant voltage source is converted into a constant current source and a constant current source into a constant voltage source. The immittance converters consist of only the passive elements reactor L and capacitor C are suitable to use in a high frequency link of power electronics.

We proposed some types of immittance converters and some applications to power electronics equipment. In this paper, we propose a new 3-phase immittance converter consist of each three L , C elements to obtain an alternating current source from a 3-phase voltage source without control.

This paper shows the configuration of the new 3-phase immittance converter that operates on either the anti-phase or the in-phase between the input voltage and the output voltage, and its voltage-current transformation characteristics and efficiency characteristics.

キーワード：三相，イミタンス変換器，特性インピーダンス，効率，電流変動率

Keywords: 3-phase, immittance converter, characteristic impedance, efficiency, regulation of current

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ものを言う。イミタンス変換器を用いると電圧源は容易に電流源に変換できる。共振形のイミタンス変換器は L , C 受動素子のみで構成され，高効率でパワーエレクトロニクスの高周波リンクに用いるのに適している。

著者らは数種類のイミタンス変換器とその応用^{(1),(2)}について提案してきたが本論文では三相交流に対して有効な三相イミタンス変換器を提案する。三相イミタンス変換器は三相電源の連系，大電力の定電流源を無制御で得る場合等に適していると考えられる。

本論文は，入力・出力が逆相または同相で動作するイミタンス変換器の構成を示し，変換特性，効率等の基本特性について述べる。

2. イミタンス変換器

図1にイミタンス変換器の1つである T-LCL 形イミタンス変換器を示している。以下，三相イミタンス変換器と区別するために単相イミタンス変換器と称する。

図1 単相イミタンス変換器

Fig.1. Single-phase Immittance Converter

単相イミタンス変換器を，共振周波数 $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ にお

ける4端子行列で表すと次式ようになる。

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

ただし、 $Z_0 = \sqrt{L/C}$: 特性インピーダンス

4端子定数の $\dot{A}=\dot{D}=0$ であることがイミタンス変換器の特徴である。

式(1)より

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

となり、入力電圧 V_1 と出力電流 I_2 が比例し入力電流 I_1 と出力電圧 V_2 が比例する。したがって入力電圧 V_1 が定電圧源で一定電圧あれば、出力電流は I_2 一定すなわち定電流源に変換される。また、式(2)より入力電圧 V_1 は出力電流 I_2 より90度進み、入力電流 I_1 は出力電圧 V_2 より90度進みとなる。

3. 三相イミタンス変換器

<3.1> 単相イミタンス変換器の三相接続

図2は単相イミタンス変換器3個で構成した三相イミタンス変換器を示している。部品点数は単相イミタンス変換器の3倍必要で、力率1のとき a, b, c 相電圧と a', b', c' 相電圧の位相差は90度となる。

図2 単相イミタンス変換器3個で構成した三相イミタンス変換器

Fig.2. 3-phase Immittanance Converter that consists of Single-phase Immittanance Converters

<3.2> 逆相回路

図3(i)に提案する三相イミタンス変換器の回路を示す。

三相電源 三相イミタンス変換器 三相負荷

(i) 回路図

(i) circuit

(ii) フェーザ図

(ii) phasors

図3 三相イミタンス変換器 (逆相回路)

Fig.3. 3-phase Immittanance Converter (Anti-phase circuit)

Cは無損失、Lは等価直列抵抗rによる損失があるものとする。電源周波数とLC共振周波数が $\omega_r = 1/\sqrt{LC}$ で一致するならば、入力と出力の関係は次式の四端子行列で表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{1a} \\ \dot{I}_{1a} \end{bmatrix} = \frac{-1}{1 - \frac{\alpha}{\sqrt{3}Q}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}Q} & Z_0 \left(1 - j\frac{1}{Q}\right) \\ \frac{1}{Z_0} & \frac{1}{\sqrt{3}Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{2a} \\ \dot{I}_{2a} \end{bmatrix}$$

$$\cong - \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}Q} & Z_0 \\ \frac{1}{Z_0} & \frac{1}{\sqrt{3}Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{2a} \\ \dot{I}_{2a} \end{bmatrix} \quad (3)$$

ただし, $Z_0 = \sqrt{L/3C}$: 特性インピーダンス
 $\alpha = \exp(j2\pi/3)$, $Q = \omega L/r$

Q が大きいとき 4 端子定数の A と D は 0 となるのでイミタンス変換器である。式(3)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。

入力電圧 V_{1a} と出力電流 I_{2a} , 入力電流 I_{1a} と出力電圧 V_{2a} は逆相の関係になるのでこの回路を逆相回路と呼ぶことにする。電流, 電圧フェーザは図 3(ii)となる。 $\dot{I}_2$ は $\dot{V}_1$ と逆相となる。 $\dot{V}_2$ と $\dot{I}_2$ の位相差は負荷の力率で決まる。 $\dot{I}_1$ は $\dot{V}_2$ と逆相である。

式(3)より V_2 , I_2 は,

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= Z_0 I_1 - \frac{Z_0}{\sqrt{3}Q} I_2 \\ I_2 &= \frac{1}{Z_0} V_1 - \frac{1}{\sqrt{3}Q Z_0} V_2 \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

となり, 出力電流 I_2 と出力電圧 V_2 は変換項 (第 1 項) と変動項 (第 2 項) に分けて考えることができる。式(4)の第 2 項の係数はそれぞれ定電圧源の内部抵抗および定電流源の内部コンダクタンスを表している。

負荷力率 1 のときの効率 η は以下の式になる。

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{3}Q} \left(\frac{Z_2}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_2} \right) + 1 - \frac{1}{\sqrt{3}Q}} \quad (5)$$

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

$$\eta_{\max} = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{3}Q} + 1}$$

$$\cong 1 - \frac{1}{\sqrt{3}Q} \quad (6)$$

$Q = 100$ のとき最大効率 $\eta_{\max} = 99.4\%$ となり, T-LCL 形の最大効率⁽³⁾ 98.0% よりはるかに大きく, 効率の高いハイブリッド形⁽⁴⁾ の 99.0% よりさらに高い効率を持っている。

<3.3> 同相回路

図 4(i) に示す回路は, 図 3 のコンデンサ C とリアクトル L の順序が入れ替わっている。電源の相順序を逆にしたと考えるとよい。

三相電源 三相イミタンス変換器 三相負荷

(i) 回路図

(i) circuit

(ii) フェーザ図

(ii) phasors

図 4 三相イミタンス変換器 (同相回路)

Fig.4. 3-phase Immittance Converter
(In-phase circuit)

共振周波数における四端子行列は次式で表される。

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_{1a} \\ \dot{I}_{1a} \end{bmatrix} = \frac{1}{1 + \frac{\alpha^2}{\sqrt{3}Q}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}Q} & Z_0 \left(1 - j\frac{1}{Q}\right) \\ \frac{1}{Z_0} & \frac{1}{\sqrt{3}Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{2a} \\ \dot{I}_{2a} \end{bmatrix}$$

$$\cong \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{3}Q} & Z_0 \\ \frac{1}{Z_0} & \frac{1}{\sqrt{3}Q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_{2a} \\ \dot{I}_{2a} \end{bmatrix} \dots\dots\dots (7)$$

ただし、 $Z_0 = \sqrt{L/3C}$:特性インピーダンス
 $\alpha = \exp(j2\pi/3)$, $Q = \omega L/r$

Q が大きいとき 4 端子定数の A と D は 0 となるのでイミタンス変換器である。図 3 の逆相回路と比較すると入力電圧 V_{1a} と出力電圧 V_{2a} , 入力電流 I_{1a} と出力電流 I_{2a} が同相になる。この回路を同相回路と呼ぶことにする。

電流、電圧フェーザは図 4 (ii) に示している。

式(7)より、 V_2 , I_2 は

$$\left. \begin{aligned} V_2 &= Z_0 I_1 - \frac{Z_0}{\sqrt{3}Q} I_2 \\ I_2 &= \frac{1}{Z_0} V_1 - \frac{1}{\sqrt{3}Q Z_0} V_2 \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (8)$$

となり、式(4)と同じ変換特性となる。

効率 η は以下の式になる。

$$\eta = \frac{1}{\frac{1}{\sqrt{3}Q} \left(\frac{Z_2}{Z_0} + \frac{Z_0}{Z_2} \right) + 1 + \frac{1}{\sqrt{3}Q}} \dots\dots\dots (9)$$

式(5)と比較すると分母の第 3 項が正であり、逆相回路より効率は低い。

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

$$\eta_{\max} = \frac{1}{\frac{3}{\sqrt{3}Q} + 1}$$

$$\cong 1 - \frac{3}{\sqrt{3}Q} \dots\dots\dots (10)$$

式(10)より $Q = 100$ のとき最大効率は 98.3%となる。

4. 逆相回路と同相回路の比較

図 5 は、三相イミタンス変換器の逆相回路と同相回路の、コンデンサ C とリアクトル L の電圧・電流フェーザを示している。抵抗負荷の場合、負荷電圧と負荷電流は同相とな

るので、逆相回路では逆相動作、同相回路では同相動作となる。同じ電源電圧、負荷電流に対して、同相動作の方が C と L にかかる電圧は大きい。したがって、 C と L の素子電流 $\dot{I}_C$, $\dot{I}_L$ も大きい。

出力電流は C と L の電流の和である。逆相動作の方が $\dot{I}_C$, $\dot{I}_L$ の位相差が小さく、すなわち無効電流が小さいので効率は高い。

図 5 コンデンサ C とリアクトル L の電圧・電流フェーザ図

Fig.5. Voltage and a current phasor of capacitor C and reactor L

5. 電力の制御

三相イミタンス変換器を通過する電力は

$$P = 3V_1 I_1 \cos \theta \dots\dots\dots (11)$$

ただし、 θ : 力率角

逆相回路の場合は、 V_1 が V_2 と逆相ならば電力の流れは

$V_1 \rightarrow V_2$ で

$$P = -3 \frac{V_1 V_2}{Z_0} \cos \theta \quad \dots \dots \dots (12)$$

であるから、 V_2 または V_1 を変化することによって電力を制御でき、 V_2 の極性によって電力潮流の方向も変えられる。 V_2 の極性を V_1 と同相とすれば、電力の流れは $V_2 \rightarrow V_1$ にすることができる。 V_1 、 V_2 の位相は逆相のままで、L、C の接続を変えて、同相回路とし、電力潮流を V_2 側 $\rightarrow$ V_1 側とする方が効率は高い。表 1 に逆相、同相回路と V_1 、 V_2 の位相による電力潮流を示している。

表 1 電力潮流
Table1. Power flow

回路 動作	逆相回路 V_1, I_2 : 逆相 V_2, I_1 : 逆相	同相回路 V_1, I_2 : 同相 V_2, I_1 : 同相
逆相動作 V_1, V_2 : 逆相	$V_1 \rightarrow V_2$	$V_1 \leftarrow V_2$
同相動作 V_1, V_2 : 同相	$V_1 \leftarrow V_2$	$V_1 \rightarrow V_2$

図 6 は図 3 の逆相回路の三相負荷端子に三相電源 V_{1a} 、 V_{1b} 、 V_{1c} と同一周波数の別電源 V_{2a} 、 V_{2b} 、 V_{2c} を接続したものである。逆相回路であるから I_2 は V_1 と逆相である。 V_1 と V_2 が逆相であれば抵抗負荷と同様で電力の流れは V_1 側から V_2 側である。負荷の起電力 V_2 が電源電圧 V_1 と同相であると、電源電流 I_1 の方向は負荷電圧 V_2 の極性で決まるので電源電圧 V_1 とは逆相になる。したがって電源は供給電力が負に変わって電力を吸収し、負荷は電力が負になるから電力を放出する。すなわち、電力の流れは負荷側から電源側 $V_2 \rightarrow V_1$ となる。

連系リアクトルの場合と異なり、電圧の極性および大きさで電力の流れを制御できる。

図 6 三相イミタンス変換器 (系統連系)
Fig.6. 3-phase Immittance Converter
(Interactive connection)

6. 特性計算

図 3、4 の三相イミタンス変換器に抵抗負荷を接続し、共振周波数の定電圧を入力したときの特性を図 7、8 に示している。入力に $V_1 = 30$ V を加え、リアクトルの L の Q を $Q = 100$ 、 $Z_0 = 10 \Omega$ とし、負荷インピーダンス Z_2 を特性インピーダンス Z_0 の 0~3 倍の 30Ω まで変化させている。図中実線は計算値、マークはシミュレーション結果である。

図 7 出力特性 (逆相回路および同相回路の逆相動作)
Fig.7. Output characteristics
(Anti-phase operation of Anti- and In-phase circuit)

図 8 出力特性 (同相回路および逆相回路の同相動作)
Fig.8. Output characteristics
(In-phase operation of In- and Anti-phase circuit)

図 7 は式(4), (5)による逆相回路の特性で, 同相回路でも逆相動作のときはこの特性になる。図 8 は式(8), (9)による同相回路の特性で, 逆相回路でも同相動作のときはこの特性になる。計算結果とシミュレーション結果である。

図 7, 8 より一定電圧 30V 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 3A 一定となっている。入力電圧は出力電流に比例し, 入力電流と出力電圧が比例している。

電圧・電流変換率は特性インピーダンス Z_0 で決まる。出力電流変動率は Z_0 と Q で決まり, 内部抵抗の計算値は 1730Ω で, 負荷抵抗 0~30Ω の電流変動率は 1.7% である。

効率は逆相動作と同相動作で異なる。逆相動作は非常に高い効率を持っており $Q=100$ のとき 99.4% である。同相動作では約 1.1% 低い。

7. むすび

提案した三相イミタンス変換器は単相イミタンス変換器 3 個で構成するより, 部品点数を減少することができる。

三相イミタンス変換器は, 負荷電圧に影響されずに定電圧入力が定電流出力になる。

提案した三相イミタンス変換器には電圧逆相と電圧同相の動作があり, 変換特性は同じであるが, 効率は異なる。

負荷電圧を正から負まで連続的に変化すれば, イミタンス変換器を通過する電力は正から負まで連続的に変化することができる。

効率は $Q=100$ のとき逆相動作では出力電圧が入力電圧の 1/2~2 倍で 99% 以上となり, 最大効率は 99.4% となる。同相動作では同じ条件で効率が 98% 以上となり, 最大効率は 98.3% となる。

提案した三相イミタンス変換器は, ある機能を持った回路としては非常に高い効率を持っていると言えるであろう。しかし, 50, 60Hz の低周波三相交流に対しては L , C のインダクタンス, 静電容量が大きくなりすぎる問題点はある。

提案した三相イミタンス変換器は線間電圧から相電流を得る回路構成になっているので, 不平衡三相の電源に対して問題なく動作すると考えられる。

電源電圧に含まれる高調波の影響は, 詳細は未検討であるが線形回路であるから重ね合わせの定理が適用できるであろう。すなわち, 基本波は電圧・電流変換されて定電流源となり, 高調波は容量結合でほぼ定電圧源になると考えられる。

(平成 13 年 5 月 21 日受付, 平成 14 年 1 月 4 日再受付)

参考文献

- (1) 山名, 入江:「イミタンス変換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)
- (2) 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」電学学会論文誌, 117-D, 8, 962-969 (1997)
- (3) 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
- (4) 入江, 川端:「ハイブリッド形イミタンス変換器の効率特性」, 電気学会論文誌, 121-D, 1, 119-124(2001)
- (5) 西浴貴之・入江寿一:「三相イミタンス変換器の構成」, 平成 12 年電気関係学会関西支部連合大会, G4-21
- (6) 西浴貴之・入江寿一:「三相イミタンス変換器の効率」, 平成 13 年電気学会全国大会, 4-093

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チョップ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。

西浴 貴之

(学生員) 1976年8月28日生。2000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。