

フリーホイーリングダイオードを付加した半波整流回路の出力特性

佐藤 信 広*

(昭和 50 年 9 月 10 日 受理)

Output Characteristics of Half-Wave Rectifier Circuit With Diode FD

Nobuhiro SATO

(Received September 10, 1975)

LC フィルタをもった単相半波整流回路にフリーホイーリングダイオードを付加し、その特性の 1 つである波形解析を行なった。さらにその裏付けを得るために実験的にも検討を行ないよい結果を得た。

1 ま え が き

直流高電圧電源回路の基本回路として単相半波整流回路があげられ通常 LC フィルタを通して負荷に接続される。この回路の特性についてはいろいろ報告されているが⁽¹⁾、それらは平滑の主体がコンデンサ C の場合とリアクトル L の場合との 2 つに分けられる。出力電圧が平滑されている状態では、C が平滑の主体の場合 L に流れる電流は断続となり、L が平滑の主体の場合には L に流れる電流は連続となる。L が平滑の主体の場合、入力のある半サイクル終了時に貯えられたエネルギーを負の半サイクルに電源に帰還していたものをフリーホイーリングダイオード (以下 FD と記す) を付加して循環させ、平滑作用をより効果的にする場合が多い。FD を付加した場合、効果的ではあるが C なしで解析されており、LC フィルタをもった回路に FD を付加した一般的な見通しをたてた特性解析はなされていない。この一般的な見通しを得ることを目的として、今回は特性の基本となる出力電圧、電流の瞬時式を導出し、理論的に検討を行なうとともにその裏付けを得るために実験結果とも比較検討することとした。

2 出力波形の解析

供試回路は Fig.1 に示す。記号の説明をする。D-1, D-2; 整流器, L; リアクトル, C; 電解コンデンサ, R; 負荷抵抗。この回路は LC フィルタをもった半波整流回路に D-2 を付加したものである。D-2 の効果は L と

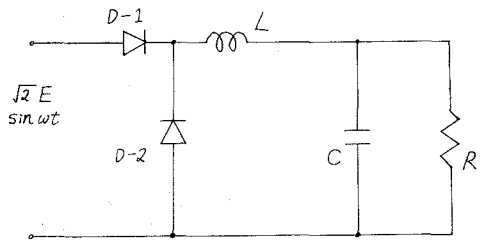


Fig.1 : Half-Wave rectifier circuit

R, C と R の 2 つの時定数の大小によって生じる。Fig.1 の回路で L を流れる電流 i_1 の正方向、負荷 R を流れる電流 i_2 の正方向、そして C の端子電圧ならびに極性を Fig.2 の

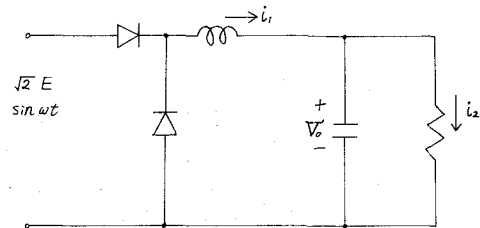


Fig.2

ようにとることとする。すると、リップル含有の少ない方がよいという見地からすると電源電圧、 i_1 , Ri_2 の大まかな波形は Fig.3 の如くである。Fig.3 (a) は i_1 が連続の場合であり、(b) の方は i_1 が不連続の場合である。ここで Fig.1 の回路の動作理論について述べることにする。

* 電気工学科

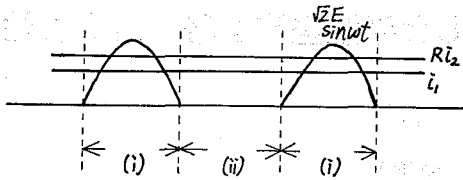


Fig. 3(a) : Waveforms of i_1 and Ri_2 (i_1 ; continuousness)

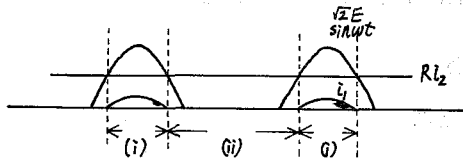


Fig. 3(b) : Waveforms of i_1 and Ri_2 (i_1 ; discontinuousness)

(1) リアクトル電流 i_1 が不連続となる場合の回路動作について述べる。

(a) 整流回路の入力部に電源の正弦波形のうち正の半サイクルが加わっているものとする。電源電圧より出力電圧いいかえるとコンデンサ端子電圧の方が高い間はリアクトルには電流は流れず、コンデンサと負荷抵抗との閉回路でコンデンサ蓄積電荷が放電される。(D-1; オフ, D-2; オフ)

(b) コンデンサ蓄積電荷が負荷抵抗を通して放電中に電源電圧の方がコンデンサ端子電圧より高くなるとリアクトルに電流が流れ始め、コンデンサが充電され始める。(D-1; オン, D-2; オフ)

(c) そして、再び電源電圧よりコンデンサ端子電圧の方が高くなるとリアクトル電流は再び流れなくなる。それと同時に再びコンデンサと負荷抵抗との閉回路でコンデンサ蓄積電荷が放電され始める。

(D-1; オフ, D-2; オフ)

(d) 電源が負の半サイクルになっても (c) の状態が続く。すなわち、リアクトルに電流は流れず、コンデンサと負荷抵抗との閉回路でコンデンサ蓄積電荷が放電される。(D-1; オフ, D-2; オフ)

(e) 電源が、再び正の半サイクルになると (a) の状態になり、以下同様のことがくりかえされる。

(2) 次に、リアクトル電流 i_1 が連続となる場合の回路動作について述べる。

(a) 整流回路の入力部に電源の正弦波形のうち正の半サイクルが加わっているものとする。リアクトルにはエネルギーが貯えられており、コンデンサには電荷が蓄積されている。電源電圧とリアクトルに貯えられているエネルギーとが電源となって負荷に電流

が流れる。(D-1; オン, D-2; オフ)

(b) 電源が負の半サイクルになると D-1 に逆電圧が加わり、D-1 はオフとなる。また、D-2 には順方向電圧が加わり、D-2 はオンとなる。リアクトルに貯えられたエネルギーを電源として負荷、D-2 の閉回路で電流が流れる。そして、リアクトルに貯えられたエネルギーが消費されていく。(D-1; オフ, D-2; オン)

(c) 電源が再び正の半サイクルになると、回路は (a) の状態になる。

以下同様の動作がくりかえされる。

解析を行なうにあたり次の仮定を設ける。

(1) 整流器の順方向抵抗はゼロ、逆方向抵抗は無限大である。

(2) 回路損失は無視できる。

まず、 i_1 が連続の場合、すなわち Fig. 3(a) について考える。(i) の範囲では Fig. 4(a) の等価回路となり、(ii) の範囲では Fig. 4(b) の等価回路となる。電流の正方向を Fig. 4(a), Fig. 4(b) の矢印のようにとり、またリアクトルとコンデン

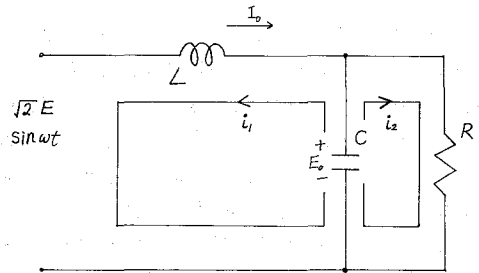


Fig. 4(a) : Equivalent circuit of Fig. 3(a), No. 1

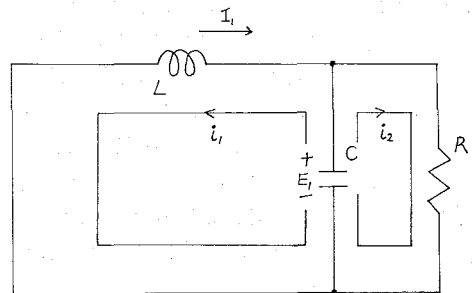


Fig. 4(b) : Equivalent circuit of Fig. 3(a), No. 2

サの初期値ならびにその極性も Fig. 4(a), Fig. 4(b) のようにとることとする。すると、 i_1, i_2 は次のようになる。すなわち (i) の範囲では、

$$i_1 = \frac{\sqrt{2}E}{CLR \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \left(\omega - \frac{1}{\omega CL} \right)^2 \right\}} \times \left[\left(\frac{1}{\omega CR} + \omega CR - \frac{R}{\omega L} \right) \right]$$

$$\begin{aligned} & \times \cos \omega t - \frac{1}{\omega^2 CL} \sin \omega t + \left(\frac{1}{\omega CR} + \omega CR - \frac{R}{\omega L} \right) \times \frac{e^{-\frac{t}{2CR}}}{\sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} \\ & \times \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t + \gamma \right) - \frac{\omega^2 - \frac{2}{CL} + \left(\frac{1}{CR} \right)^2}{\omega} \\ & \times \frac{\sqrt{CL}}{\sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t \right) \Big] \\ & + \frac{I_0}{\sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t + \gamma \right) \\ & + \left(\sqrt{\frac{C}{L}} E_0 - \sqrt{\frac{L}{C}} \frac{I_0}{R} \right) \times \frac{1}{\sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \\ & \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t \right) \end{aligned} \quad (1)$$

ただし $\gamma = \tanh^{-1} \left(-\sqrt{1 - \frac{4CR^2}{L}} \right)$

$$\begin{aligned} i_2 = & \frac{\sqrt{2} E}{CLR \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \omega^2 \left(1 - \frac{1}{\omega^2 CL} \right)^2 \right\}} \times \left[-\frac{1}{\omega CR} \cos \omega t \right. \\ & + \left(\frac{1}{\omega^2 CL} - 1 \right) \times \sin \omega t - \frac{1}{\omega CR \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \\ & \times \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t + \gamma \right) \\ & + \frac{\sqrt{CL} \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \omega^2 - \frac{1}{CL} \right\}}{\omega \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \\ & \times \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t \right) \Big] - \frac{E_0}{R \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \\ & \times \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t + \gamma \right) \\ & + \frac{I_0}{R \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t \right) \end{aligned} \quad (2)$$

ただし $\gamma = \tanh^{-1} \left(-\sqrt{1 - \frac{4CR^2}{L}} \right)$

(ii)の範囲では

$$i_1 = \frac{I_0}{\sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t + \gamma \right)$$

$$\begin{aligned} & + \left(\frac{E_1}{L} - \frac{I_0}{CR} \right) \times \frac{\sqrt{CL}}{\sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \\ & \times \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t \right) \end{aligned} \quad (3)$$

ただし $\gamma = \tanh^{-1} \left(-\sqrt{1 - \frac{4CR^2}{L}} \right)$

$$\begin{aligned} i_2 = & -\frac{E_1}{R \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t + \gamma \right) \\ & + \frac{I_0}{R \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1}} \sqrt{\frac{L}{C}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sinh \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{\frac{L}{4CR^2} - 1} t \right) \end{aligned} \quad (4)$$

ただし $\gamma = \tanh^{-1} \left(-\sqrt{1 - \frac{4CR^2}{L}} \right)$

以上により、リアクトル電流 i_1 が連続の場合の i_1 , i_2 の瞬時式が求まった。出力電圧瞬時式は $i_2 \times R$ として求まる。

次に i_1 が不連続の場合、すなわち Fig. 3(b) について考える。(i)の範囲では Fig. 5(a) の等価回路となり、(ii)の範囲では Fig. 5(b) の等価回路となる。電流の正方向を Fig. 5(a), Fig. 5(b) の矢印のようにとり、またリアクトル

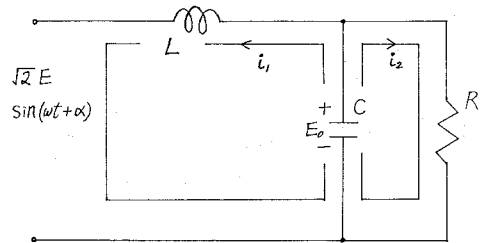


Fig. 5(a) : Equivalent circuit of Fig. 3(b), No. 1

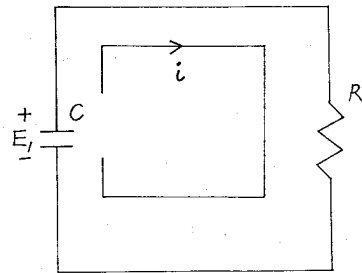


Fig. 5(b) : Equivalent circuit of Fig. 3(b), No. 2

ルとコンデンサの初期値ならびにその極性も Fig. 5(a), Fig. 5(b) のようにとることとする。すると、 i_1 , i_2 は次のようになる。すなわち (i) の範囲では、

$$\begin{aligned}
 i_1 = & -\frac{\sqrt{2} E}{RCL \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \left(\omega - \frac{1}{\omega CL} \right)^2 \right\}} \\
 & \times \left[\frac{\left(\frac{R}{\omega L} - \omega CR - \frac{1}{\omega CR} \right) \cos \alpha + \frac{1}{\omega^2 CL} \sin \alpha}{\sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}}} \right. \\
 & \times e^{-\frac{t}{2CR}} \sin \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}} t + \gamma \right) \\
 & + \frac{\omega CL \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \left(\omega - \frac{1}{\omega CL} \right)^2 \right\} \cos \alpha - \left(\frac{1}{CR} + \omega^2 CR - \frac{R}{L} \right) \sin \alpha + \frac{1}{\omega CL} \cos \alpha}{\omega^2 \sqrt{CL} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}}} \\
 & \times e^{-\frac{t}{2CR}} \sin \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}} t \right) + \left\{ \left(\frac{R}{\omega L} - \omega CR - \frac{1}{\omega CR} \right) \times \cos \alpha \right. \\
 & + \frac{1}{\omega^2 CL} \sin \alpha \left. \right\} \times \cos \omega t + \left\{ \left(\frac{1}{\omega CR} + \omega CR - \frac{R}{\omega L} \right) \times \sin \alpha + \frac{1}{\omega^2 CL} \cos \alpha \right\} \\
 & \times \sin \omega t \left. \right] + \frac{E_0}{\sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}}} \sqrt{\frac{C}{L}} e^{-\frac{t}{2CR}} \times \sin \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}} t \right) \quad (5)
 \end{aligned}$$

ただし $\gamma = \tan^{-1} \left(-\sqrt{\frac{4CR^2}{L} - 1} \right)$

$$\begin{aligned}
 i_2 = & \frac{\sqrt{2} E}{CLR \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \left(\omega - \frac{1}{\omega CL} \right)^2 \right\}} \times \left[-\frac{\frac{1}{\omega CR} \cos \alpha + \left(1 - \frac{1}{\omega^2 CL} \right) \sin \alpha}{\sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}}} \right. \\
 & \times e^{-\frac{t}{2CR}} \sin \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}} t + \gamma \right) \\
 & + \frac{\omega CL \left\{ \left(\frac{1}{CR} \right)^2 + \left(\omega - \frac{1}{\omega CL} \right)^2 \right\} \cos \alpha - \frac{1}{CR} \sin \alpha + \left(\omega - \frac{1}{\omega CL} \right) \cos \alpha}{\omega^2 \sqrt{CL} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}}} \\
 & \times e^{-\frac{t}{2CR}} \sin \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}} t \right) - \left\{ \frac{1}{\omega CR} \cos \alpha + \left(1 - \frac{1}{\omega^2 CL} \right) \right. \\
 & \times \sin \alpha \left. \right\} \times \cos \omega t + \left\{ \frac{1}{\omega CR} \sin \alpha + \left(\frac{1}{\omega^2 CL} - 1 \right) \cos \alpha \right\} \times \sin \omega t \left. \right] \\
 & - \frac{E_0}{R \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}}} e^{-\frac{t}{2CR}} \sin \left(\frac{1}{\sqrt{CL}} \sqrt{1 - \frac{L}{4CR^2}} t + \gamma \right) \quad (6)
 \end{aligned}$$

ただし $\gamma = \tan^{-1} \left(-\sqrt{\frac{4CR^2}{L} - 1} \right)$

(ii)の範囲では

$$i = \frac{E_1}{R} e^{-\frac{t}{CR}} \quad (7)$$

以上により、リアクトル電流 i_1 が不連続の場合の i_1, i_2, i が求まった。出力電圧瞬時式は $i_2 \times R$ および $i \times R$ とし

て求まる。

3 結果と検討

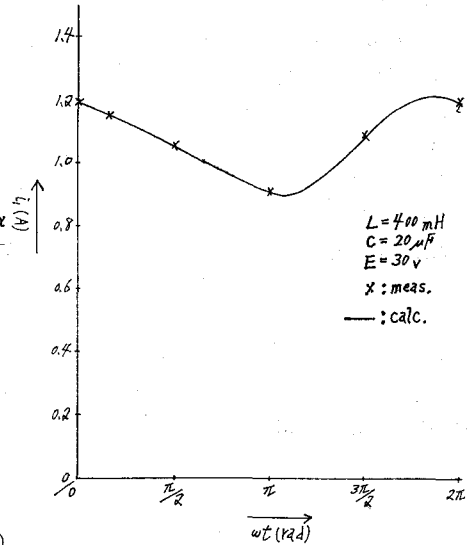


Fig.6(a) : Result, No. 1

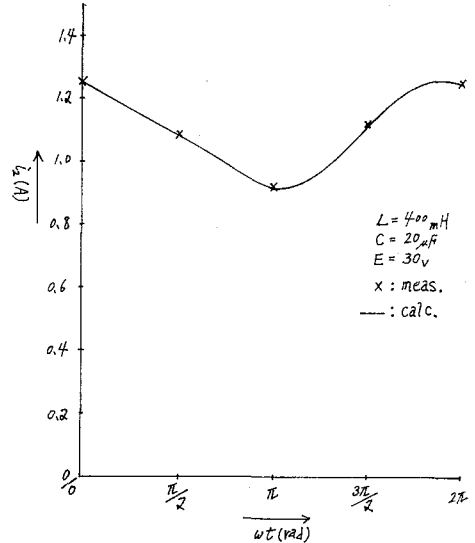


Fig.6(b) : Result, No. 2

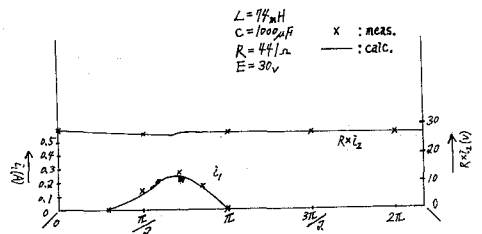


Fig.7 : Result, No. 3

結果は Fig.6, Fig.7 に示す。実測値と計算値とはよく一致しており導出した式が妥当であることがわかる。これより、 $L > 4CR^2$ の範囲内では FD の効果はあるが、 $L < 4CR^2$ の範囲では効果はなく付加しない時と同じであるということがわかる。現在、数百ボルト程度で数千 μF の電解コンデンサは比較的小形でかつ安価に得られるが、高電圧時を使用する場合、高電圧大容量コンデンサは大形となるのでおのずから限度がある。それで、 $L > 4CR^2$ の範囲に入るように、中ないしは小容量コンデンサを用いて FD を付加するとよい。また、 $L > 4CR^2$ という関係から重負荷時になるに従ってリアクトルの値のとり得る範囲は広がる。

4 あとがき

以上により LC フィルタをもった半波整流回路に FD を付加した時の出力電圧、電流の瞬時式を導出し、実験結果

と比較検討した。その要約をすると次の如くである。

- (1) $L < 4CR^2$ の範囲では FD を付加しても何ら効果がない。
- (2) $L > 4CR^2$ の範囲では FD を付加すると効果があり、出力のリプル分を減少できる。
- (3) (2) と関連して、重負荷になるにしたがってリアクトルの値のとりうる範囲は広がる。

稿を終るにあたり、本研究の遂行に便宜いただきました本校山田正保助教授、激励いただきました大阪工業大学短期大学部小寺正暁学長、岐阜大学工学部村井由宏教官のみなさまに深く感謝致します。

文 献

- (1) たとえば
多田一彦他、電気学会全国大会論文集[4]、(昭49) 563