

# 부하 단락을 고려한 직렬공진형 컨버터의 운전해석

박민호      홍순찬, 윤덕용, 박영진, 김지한<sup>\*</sup>  
서울대학교      단국대학교

## Operation Analysis of Full-Bridge Series Resonant Converters with Considering the Load Short

Min-Ho Park      Soon-Chan Hong, Duck-Yong Yoon, Young-Jeen Park, Ji-Han Kim

Seoul National University

Dankook University

### Abstract

The full-bridge series resonant converter is analyzed to limit the maximum values of the current and the voltage across resonant capacitor in the case of load short. If the converter is operated in the optimal region derived in this paper, the maximum value of short-circuit current will be smaller or equal to that of the current in steady operation. Since the additional facilities for the protection against load short do not need, converters have advantages in weight, size, and cost.

- Wo : 공진 각주파수
- Icp : 연속 운전시 전류의 최대값
- Idp : 불연속 운전시 전류의 최대값
- Isp : 단락시 전류의 최대값
- Vci : t<sub>i</sub>일때 Cr의 양단전압
- Vcp : 연속 운전시 Cr양단전압의 최대값
- Vdp : 불연속 운전시 Cr양단전압의 최대값
- Vsp : 단락시 Cr양단전압의 최대값
- Vs : 전원전압
- Vo : 출력전압
- Q : 입력전압에 대한 출력전압의 비 (Vo/Vs)
- α : 다이오드 도통각
- A : 트랜지스터 도통각

### 1. 서론

공진형 컨버터는 단위체적당 출력이 크고 효율이 높으므로 초기에는 주로 항공산업분야에서 직류 전력 변환기로 사용되어 왔으며 최근에는 PWM 직류-직류 컨버터에 대체되어 공장자동화 및 사무자동화 분야에 널리 사용되고 있다<sup>1)~5)</sup>.

컨버터가 정상상태로 운전되고 있을 때 부하 단락사고가 발생하면 높은 단락전류가 흘러 컨버터에 손상을 입히게 된다. 이러한 경우에 계통을 보호하기 위하여 단락전류 검출기, 차단기 및 이를 위한 제어기등의 별도의 회로를 설치하는 것이 일반적이다.

본 연구에서는 Full-Bridge 직렬공진형 컨버터를 대상으로 하여 단락사고시에도 단락전류 및 공진 커패시터 전압의 최대값을 제한할 수 있는 운전조건을 해석을 통하여 제시하고자 한다.

### - 기호 설명 -

- Lr : 공진 인덕턴스
- Cr : 공진 커패시턴스
- Zo : 특성 임피던스

$$Z_o = \sqrt{L_r/C_r} \tag{1}$$

$$W_o = 1/\sqrt{L_r C_r} \tag{2}$$

### 2. 직렬공진형 컨버터

본 연구에서는 그림 1과 같은 full-bridge 직렬 공진형 컨버터를 대상으로 하며 컨버터의 모든 소자는 이상적이라고 가정하여 해석한다. 이 컨버터의 동작은 공진전류의 연속, 불연속에 따라 연속모우드와 불연속모우드로 나누어진다.

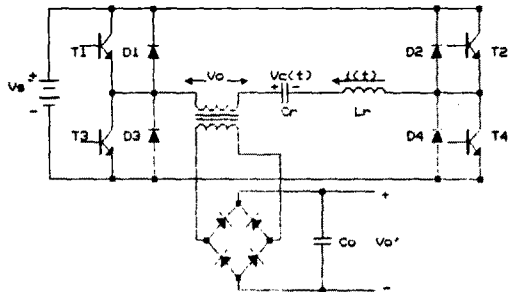


그림 1 직렬 공진형 컨버터 회로  
Fig. 1 Series resonant converter circuit.

2.1 연속모우드

그림 2는 연속모우드에서 전류파형의 한 예를 나타내고 있다.

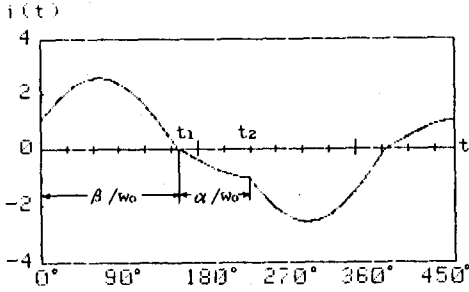


그림 2 연속모우드에서의 전류파형  
Fig. 2 Typical current waveform in continuous mode.

그림 2에서  $\beta$  구간은 그림 1에서 T2, T3가 도통되고 있는 경우이며  $i(0)=I_0$ 라고 하면

$$i(t) = I_0 \cos(\omega_0 t) + [(V_{c0} + V_s - V_0) / Z_0] \cos(\omega_0 t) \quad (3)$$

for  $0 \leq t \leq t_1$

이고  $\alpha$  구간은 D2, D3가 도통상태인 경우로  $t' = t - t_1$ 이라 하면 전류는 다음과 같다.

$$i(t') = [(V_{c1} + V_s + V_0) / Z_0] \sin(\omega_0 t') \quad (4)$$

for  $0 \leq t' \leq t_2 - t_1$

이 때의  $\alpha$ 는

$$\alpha = \omega_0 (t_2 - t_1) \quad (5)$$

이고  $\beta$ 는 (3)식에  $i(\beta/\omega_0) = 0$ ,  $\beta > 0$ 의 조건을 대입하여 구할 수 있다.

$$\beta = \omega_0 t_1 = \tan^{-1} [ -I_0 Z_0 / (V_{c0} + V_s - V_0) ] + 180^\circ \quad (6)$$

여기서  $Q = V_0 / V_s$ 를 사용하여 구한 결과 수식들을 정리하면 다음과 같다.

$$\cos^{-1} Q < \alpha \leq 180^\circ \quad (7)$$

$$\beta = 180^\circ + \tan^{-1} \left\{ \frac{-(1-Q^2)\sin\alpha}{2Q-(1+Q^2)\cos\alpha} \right\} \quad (8)$$

$$I_{cp} = \frac{V_s}{Z_0} \left( \frac{1+Q^2-2Q\cos\alpha}{Q-\cos\alpha} \right) \quad (9)$$

$$V_{cp} = \pm V_s \left\{ \frac{(1+Q)(1-\cos\alpha)}{Q-\cos\alpha} \right\} \quad (10)$$

그림 3은 각각의 Q값에 대한  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 관계를 나타내고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 Q값이 증가하려면  $\beta$ 가 증가하여야 한다.

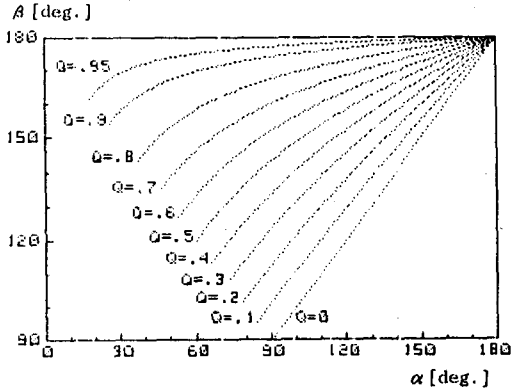


그림 3 Q값의 변화에 따른  $\alpha$ 와  $\beta$ 의 관계  
Fig. 3  $\alpha$  versus  $\beta$  with variable Q.

2.2 불연속모우드

불연속모우드로 동작할 때의 전류파형은 그림 4와 같다.

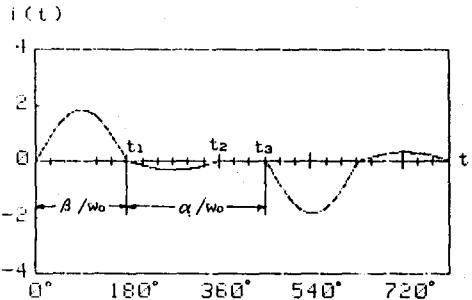


그림 4 불연속모우드에서의 전류파형  
Fig. 4 Typical current waveform in discontinuous mode.

그림 4에서  $0 \leq t \leq t_1$  구간은 T2, T3가 도통상태인 경우로

$$i(t) = [(V_{c0} + V_s - V_0) / Z_0] \sin(\omega_0 t)$$

for  $0 \leq t \leq t_1$

이다. 또한  $t_1 < t < t_2$ 인 구간 즉,  $0 \leq t' \leq t_2 - t_1$  구간은 D2, D3가 도통상태인 경우이며 전류는

$$i(t') = [(V_{c1} + V_s + V_o) / Z_o] \sin(\omega t')$$

$$\text{for } 0 \leq t' \leq t_2 - t_1$$

이다. 또한  $t_2 \leq t \leq t_3$ 인 구간에서는 전류가 0이며 따라서 불연속모우드가 된다.

불연속모우드에서의 결과수식들은 다음과 같다.

$$\alpha > 180^\circ \quad (11)$$

$$\beta = 180^\circ \quad (12)$$

$$I_{dp} = \frac{V_s}{Z_o} (1+Q) \quad (13)$$

$$V_{dp} = \pm 2V_s \quad (14)$$

### 3. 부하단락시의 해석

#### 3.1 단락시 전류와 전압의 최대값

직렬 공진형 콘버터에서  $\alpha$ 의 범위는 (7)식과 (11)식에서 알 수 있듯이  $\cos^{-1}Q$ 보다 커야 한다. 단락사고시에는 부하전압이 0이므로  $Q=V_o/V_s=0$ 이며 이때의  $\alpha$ 는  $\cos^{-1}0$  즉,  $90^\circ$ 보다 커야 한다. 단락사고시의 전류와 공진 커패시터 전압의 최대값은 식(9), (10), (13), (14)에  $Q=0$ 을 대입하면 된다.

i) 연속 모우드의 경우

$$I_{sp} = - \frac{V_s}{Z_o} \frac{1}{\cos \alpha} \quad (15)$$

$$V_{sp} = \pm V_s \left( \frac{1 - \cos \alpha}{-\cos \alpha} \right) \quad (16)$$

ii) 불연속 모우드의 경우

$$I_{sp} = \frac{V_s}{Z_o} \quad (17)$$

$$V_{sp} = V_{dp} \quad (18)$$

이상에서 알 수 있듯이 불연속모우드의 경우에는 단락사고가 일어나더라도  $I_{sp} \leq I_{dp}$ ,  $V_{sp} = V_{dp}$ 이므로 회로에 손상을 주지 않는다. 따라서 연속 모우드에서의 단락사고시에 전류와 전압의 최대값을 제한하여야 한다.

#### 3.2 연속모우드에서 단락 전류 및 전압의 제한

연속모우드에서의 전류 최대값  $I_{cp}$ 는 식(9)와 같고 부하 단락시의 전류 최대값  $I_{sp}$ 는 식(15)와 같다. 그림 5는  $Q=0.7$ 일 때  $90^\circ < \alpha \leq 180^\circ$  범위에서의  $I_{cp}$ 와  $I_{sp}$ 를 나타내고 있다. 그림에서  $\alpha = 123.6^\circ$ 일 때  $I_{sp} = I_{cp}$ 이며 따라서  $\alpha \geq 123.6^\circ$ 에서 운전하면 부하 단락사고가 발생하여도 전류의 최대값이 커지지 않는다.

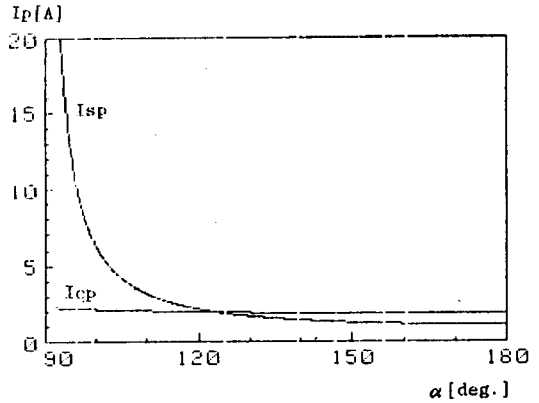


그림 5  $Q=0.7$ 일 때의  $I_{sp}$ 와  $I_{cp}$   
Fig. 5  $I_{sp}$  and  $I_{cp}$  for  $Q=0.7$ .

표 1은 각각의  $Q$ 값에서의  $I_{sp} = I_{cp}$ 인  $\alpha_c$ 값,  $\alpha_c$ 를 나타내고 있으며 그림 6에서의 곡선 A를 의미한다. 그러므로 연속모우드에서  $I_{sp} \leq I_{cp}$ 이려면  $\alpha_c \leq \alpha \leq 180^\circ$ 이고  $0 \leq Q \leq 1$ 인 범위이어야 하며 그림 6에서의 빗금친 부분이다.

표 1  $Q$ 값에 대한  $\alpha_c$   
Table.1  $\alpha_c$  with variable  $Q$ .

$Q = V_o/V_s$	$\alpha_c$ [deg.]
0.1	133°
0.2	131.2°
0.3	129.5°
0.4	127.9°
0.5	126.4°
0.6	124.9°
0.7	123.6°
0.8	122.3°
0.9	121.1°
1	120°

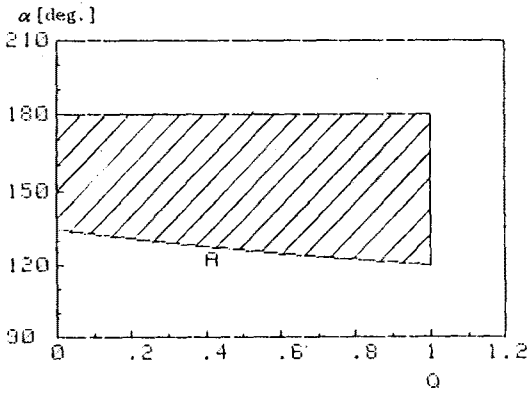


그림 6  $I_{sp} \leq I_{cp}$  위한 최적범위  
Fig. 6 Optimal region for  $I_{sp} \leq I_{cp}$ .

그림 7은  $Q=0.7$  일 때 연속모우드에서  $C_r$  양단전압의 최대값  $V_{cp}$ 와 부하단락시의  $C_r$  양단전압의 최대값  $V_{sp}$ 를 나타내고 있다. 그림에서  $\alpha=180^\circ$  일 때  $V_{sp}=V_{cp}$ 이며 따라서 연속모우드에서는 항상  $V_{sp} \geq V_{cp}$ 이다.

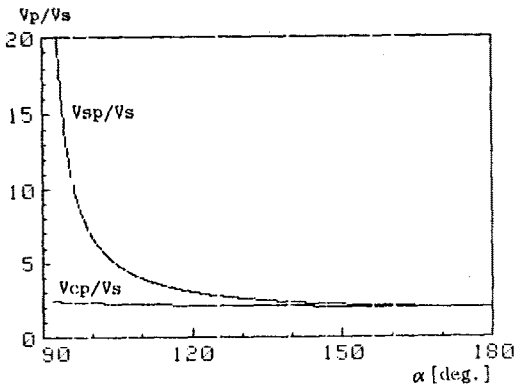


그림 7  $Q=0.7$  일때의  $V_{sp}$ 와  $V_{cp}$   
Fig. 7  $V_{sp}$  and  $V_{cp}$  for  $Q=0.7$ .

그림 5에서  $I_{sp}=I_{cp}$ 인  $\alpha_c=123.6^\circ$  일 때  $V_{sp}/V_s$ ,  $V_{cp}/V_s$ 의 값은 각각 2.807, 2.107이다. 그러므로 그림 6의 빗금친 최적범위내에서 운전할 때  $Q=0.7$ 인 경우에는 공진 커패시터의 양단전압이 최대 33% 증가하게 된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 Full-bridge 직렬공진형 컨버터를 대상으로 하여 부하단락 사고시에도 전류의 최대값을

제한하여 계통을 보호할 수 있는 운전조건을 해석을 통하여 구하였다. 본 연구에서 제시한 최적범위 내에서 컨버터를 운전하면 별도의 부가회로가 없이도 단락사고시 계통을 보호할 수 있으며 따라서 컨버터의 무게, 부피, 가격면에서 유리해진다. 그러나 공진 커패시터 양단간의 전압은 최적범위 내에서 운전하여도 단락사고시에 약간 증가하므로 ( $Q=0.7$ 일때 최대 33%) 부하단락에 대비하여 전압정격이 약간 높은 공진 커패시터를 택하여야 한다.

#### 참 고 문 헌

- 1] R. J. King and T. A. Stuart, "A Normalized Model for the Half-Bridge Series Resonant Converter," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-17, no. 2, pp. 190-198, March 1981.
- 2] R. J. King and T. A. Stuart, "Modeling the Full-Bridge Series Resonant Power Converter," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-18, no. 4, pp. 449-459, July 1982.
- 3] R. J. King and T. A. Stuart, "Inherent Overload Protection for the Series Resonant Converter," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. AES-19, no. 6, pp. 820-830, November 1983.
- 4] S. W. H. De Haan and H. Guisman, "Novel Operation and Control Modes for Series Resonant Converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. IE-32, no. 2, pp. 150-157, May 1985.
- 5] D. M. Divan, "Design Considerations for Very High Frequency Resonant Mode DC/DC Converters," IEEE IACON Record, pp. 640-647, September 1986.