창 립
40주년학술대회
논문 87-P-21-3

직렬공진 특성을 이용한 DC-DC 컨버터의 정상상태 특성해석

o
이 윤종 김 능수 김 철진 홍 금표
한양대

The Steady State Analysis of the DC-DC Converter used Series Resonant Characteristics

Y.J. Lee N.S. Kim C.J. Kim K.P. Hong
Han Yang Univ.

ABSTRACT

In high-frequency switched mode converters, Series Resonant Converter (SRC) is investigated using state-plane method. Phase plane trajectories of the SRC permit a direct colsed form solution of the steady state operation and can make problems easy to solve.

This paper describes steady state responses and characteristics of the SRC with respect to various circuit factors. The magnitute of steady state response and the average current through load are clearly related to how much the switching frequency differs from the resonant frequency. The results of the steady state analysis can be used to estimate the device and component stress on the power circuit.

1.서론

직렬공진형컨버터(Series Resonant Converter;SRC)는 일반 switching컨버터와 비교하여 우수한 EMI 특성, 고효율 및 회로의 수동소자가 소형, 경량화된다는 장점을 갖는다. 이러한 SRC의 특성해석법으로는 회로해석법[1X2], Sampled Data Modelling[3X6], 상태평면법[4](State-Plane Method)등 여러가지가 있으나 회로해석법은 수식자체가 closed-form으로 표현하기가 어려운 비선형특성을 나타내거나, SRC 해석시 적절한 파라미터를 선정하기 어려운점 등이 있다. 또한 Sampled Data Modelling 법은 정상상태 해석보다는 소신호해석(Small Signal Analysis)에 보다 유용하다. 또한 Averaging Technique 는 SRC 의 해석에는 적용할 수 없는 것으로 알려져 있다.

그리고 상태평면법은 최초의 공진전류 및 Capacitor 전압을 상태변수로 두고 상태변수들의 시간에 따른 위상평면궤적[7](Phase Plane Trajectory) 을 구하여 과도상태 및 정상상태를 해석하는 방법으로서, 수식전개가 간단할 뿐 아니라 이로부터 최초의 변수들의 상관관계를 알아낼수 있으며 회로설계에 직접 응용할수있다는 장점이 있다.

이에 따라 본연구에서는 상태평면법을 이용하여 Half Bridge Type SRC 의 정상상태를 해석하였으며 실제 SRC를 구성하여 실험한결과 이 해석법의 유용성을 입증하였다.

2. 회로구성 및 특성해석

(1) 회로구성 및 동작

SRC의 회로구성을 간단히 나타내면 그림 1과 같다. 여기서의 에너지변환방식은 공급전원을 2분할하는 Half bridge형 고주파동작의 직렬공진형컨버터를 사용한다.

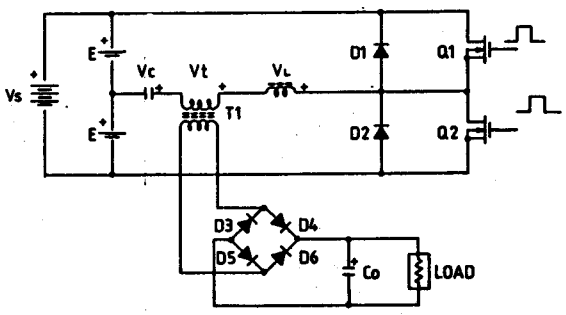

그림1.기본적인 SRC의 회로구성

(그림1)은 고주파컨버터의 부하에 정류용 브리지를 사용하고 있으므로 그대로는 해석이 곤란하다. 따라서 (그림2)와 같이 등가회로를 구성하여 컨버터회로를 해석한다.

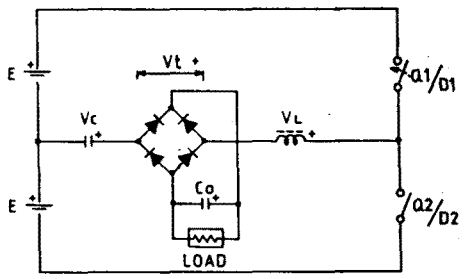

그림2. SRC 회로를 해석하기위한 등가회로

(그림2)는 (그림1)에서의 전원전압분할용 Capacitor를 등가전압원으로 표현하고 있으며, 변압기 1차측 양단전압은 권선비를 N:1로 하고 출력전압이 Vo 이므로 NVo 가된다.

정상상태에서 출력전압은 일정하게되고, 전파정류를 행하기 때문에 공진전류의 방향과 컨버터측에서 본 출력전압의 방향이 변화하게된다.

트랜지스터 Q1(Q2) 과 다이오드 D1(D2) 이 공진조건에 따라서 브리지다이오드를 통하여 스위치로 동작하게되며, 출력전압 Vo 는 IL에 따라서 입력전압 E와 같은방향 또는 반대방향을 갖는다 이러한 동작을 (그림3)에 블럭다이어그램으로 나타내었다.

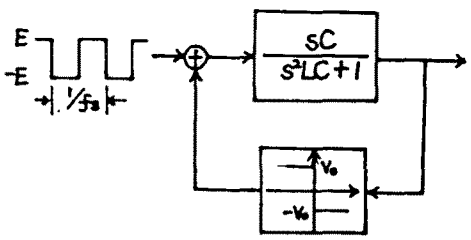

그림 3 블럭 다이어그램

스위칭소자 Q1(또는 Q2) 및 다이오드 D1(또는 D2) 의 ON동안, 에너지는 입력전원으로부터 Lr-Cr로 구성되는 공진회로 및 트랜스 T1 을 통하여 출력측에 전달된다. T1 의 2차단에 나타나는 AC 전류는 다이오드 D3,D6 와 D4,D5에 의해서 정류되고, Low-pass특성을 갖는 출력 Filter 에 의해서 Filtering되어 양호한 DC 출력특성을 나타내게된다. 여기서 출력전압의 크기는 공진전류의 크기 및 파형의 형태와 부하저항에 따라 결정되며, 출력전압은 fo 에 대한 fs 의 비를 변화함에 따라 제어할 수 있다.

부하저항 및 fs/fo의 비에 따라 SRC 회로는 연속적 또는 불연속적 전류를 나타낸다.

(2) 특성해석

서로다른 동작주파수 및 부하조건하에서 동작하는 SRC 회로의 복잡한 해석에 상태평면법을 적용하는 경우 회로의 정상상태동작을 쉽게 설명할 수 있다. 위상평면상에서 전체적인 SRC의 궤적은 (그림4)와 같다.

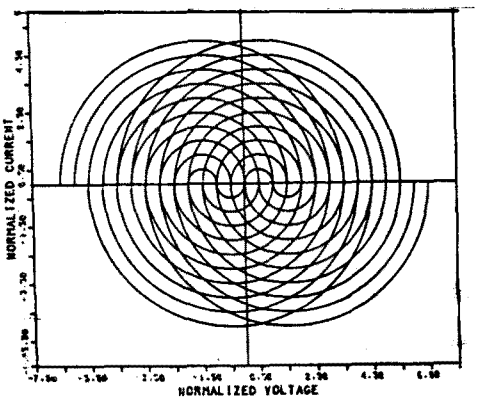

그림 4. SRC 위상평면 궤적도

SRC회로의 동작은 동작주파수에 따라 각각 연속전류동작(Continuous Conduction Mode; CCM) 및 불연속전류동작(Discontinuous Conduction Mode;DCM)을 하게된다. 각 모드에 따른 특성해석을 할때 해석상 나타나는 복잡성을 피하기 위해 다음과 같은 가정을 둔다

(a) 출력단 커패시터Co는 충분히 커서 출력전압 Vo는 수 사이클동안 일정한것으로 한다.

(b) 스위치를 비롯한 모든 반도체소자는 이상적이다.

(c) T1 및 Tank 회로를 포함한 전 SRC회로의 손실은 무시한다.

따라서 이상과 같은 가정으로부터 상태평면해석에 사용되는 상태변수는 Vc 및 IL로 한정된다. 이상적인 SRC회로의 동작으로부터 Vc, IL의 두 상태변수를 결정하여 Tank 회로의 특성을 상태평면상에서 직접 표현할 수 있으며, 정상상태에서

위상평면궤적도를 사용하여 SRC회로의 가능한 모든 조건하에서 그 특성을 나타낼 수 있다.

(그림2)로 부터 입력전원 E와 T1의 1차 양단의 전압 Vt(=NVo) 를 고려한 전압원을 V라 한다면, Q1, Q2, D1 및 D2 도통시 적용가능한 회로방정식은 다음과 같다.

$$V = L\,(dI/dt)$$
$$I\ell = C\,(dV/dt) \qquad (1)$$

여기서, 입력전압 E를 기준으로하여 차원을 갖지 않는 값으로 Iℓ, Vc, Vo 의 제량들을 일반화(Nomalization) 하면 다음과 같다.

$$I\ell n = (I\ell \cdot Zo) / E$$
$$Vcn = Vc / E \qquad (2)$$
$$Von = Vt / E = (NVo) / E$$
$$Vn = V / E$$

V 는 Q1, Q2, D1 및 D2 의 도통기간에 따라 다음과 같이 각각 다르게 표현할 수 있다.

Q1 도통: $V = E - Vt$

Q2 도통: $V = -(E - Vt)$

D1 도통: $V = E + Vt$ (3)

D2 도통: $V = -(E + Vt)$

따라서 (1),(2)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\begin{pmatrix} Vcn \\ Iln \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Wo \\ -Wo & 0 \end{pmatrix}\begin{pmatrix} Vcn \\ Iln \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ Wo \times V/E \end{pmatrix} \qquad (4)$$

식(4) 를 상태평면해석에 알맞게 정리하면 다음과 같은 식을 얻는다.

$$[Vcn \mp (1-Von)]^2 + [I\ell n]^2 = R1^2 \qquad (5)$$
$$[Vcn \mp (1+Von)]^2 + [I\ell n]^2 = R2^2 \qquad (6)$$

단,

$$R1 = [(Vcn(0) \pm (1-Von))^2 + (\pm I\ell n(0))^2]^{1/2}$$
$$R2 = | \pm Vcn(0) \mp (1+Von) |$$

SRC 회로해석에서 동작영역은 (그림2)의 Q1, Q2 및 D1, D2 가 반주기당 1회 동작한 것으로 하면 타당하다.[5] 이때 α 및 β는 다이오드 및 스위칭소자에 흐른 전류의 시간적인 변화각과 같다

(i) 영역 I: $fo/2 < fs < fo$

공진점 이하에서의 CCM동작영역

(ii)영역II: $fo < fs$

공진점 이상에서의 CCM동작영역

(iii) 영역III: $fs < fo/2$

공진점 이하에서의 DCM 동작영역

영역II ($fo < fs$)에서의 동작은 자기소호능력이 있는 스위치(MOSFET, BJT, GTO 등) 를 사용하는 경우에서만 가능한 영역이다.

해석에서의 영역분류는 반드시 스위치 및 역병렬다이오드는 1/2주기마다 1회 도통하는것을 기준으로 하였으므로 영역III ($fs < fo/2$) 에서의 위상평면궤적은 $fs/fo=1/2$되는 점에서 존재하게되고 이 영역에서의 출력전압은 switching 주파수수에 비례하게된다

3. 시뮬레이션 및 실험결과

시뮬레이션결과는 그림5 와 같다.

실험에 사용한 회로의 제 정수는 다음과 같다.

$E = 50$ V, $C = 0.047\,\mu$F, $L = 178\,\mu$H

이론해석에대한 비교검토를 위해 특성 임피던스 Zo가 61 Ohm이며 55 KHz 의 자연공진주파수 fo 를 갖는 실험용 컨버터를 구성하였다.

실험회로에 MOSFET 를 사용하였고 이는 Drain전류가 0일때 전압이 스위칭되므로 공진점이상의 주파수에서의 동작이 가능하다.

실험결과로 부터 다음과 같은 사항을 알 수 있다.

1)스위치양단의 전압은 전류가 0일때 스위칭되므로 기본주파수에서 보다 높은 di/dt가 없다. 따라서 회로에서부터 발산되는 고주파 에너지의 양보다 적다

2)누설인덕턴스는 직렬공진회로의 일부로서 사용되므로 누설 인덕턴스에 의한 영향이 최소로 된다. 따라서 누설 인덕턴스에 의한 고주파전류 및 전압 spike가 제거된다.

3)converter 에서 peak stress 는 동작점에 따라서 결정된다.

4)Peak Switch 전류 및 Inductor 전류는 컨버터가 적절하게 설계되지 않은 경우 필요한 양의 2배 정도로 크게된다.
또한 공진점 이상의 동작점에서는 동일한 converter 에서 현저하게 낮은 stress 를 받는다.

5)회로의 설계시 Iℓ(avg), Iℓ(peak), Isw(avg), Vc(peak)등이 중요한 파라미터로 된다.

6)주파수가 극히 높아지는 경우 스위칭 소자에 나타나는 커패시턴스성분등의 앞서 가정한 이상화한 조건들을 고려해야 한다.

4. 결론

SRC를 상태평면에서 해석함으로써 회로내 제 정수들의 관계를 손쉽게 알 수 있었다. 이러한 과정은 고주파에서 동작하는 Inverter, PRC(Parallel Resonant Converter)등의 Converter에 적용하는 경우에도 유용한 해석이 가능할 것으로 기대된다.

5. 참고문헌

1) R.J King et al., "A Normalized Model for the Half-bridge Series Resonant Converter", IEEE Trans. AES,vol.17, pp.190-198,1981

2) S.K.Cuk et al., "A Complete dc Analysis of the Series Resonant Converter",IEEE Power Electrics Specialists,Conf. Ref., pp.85-100,1982

3) G.C. Verghese, "A General Approach to Sampled-data Modelling for Power Electronic Circuits" IEEE Trans. PE, vol.1, No.2. pp.76-89, 1986

4) R. Oruganti et al, "Resonant Power processors," IEEE Trans. IA,vol.21,No.6, pp. 1453-1471, 1985

5) A.F.Witulsk et al,"Steady-State Analysis of the Series Resonant Converter",IEEE Trans.AES,vol.21, pp.791-799, 1985

6) A.R.Brown et al., "Sampled-data Modelling of Switching Regulators", in Advances in Switch Mode Power Conversion Tesla co. pp. 1-21,1983

7) D.P.Atherton, Nonlinear Control Engineering, London, Van Nostrand Reinhold, 1982

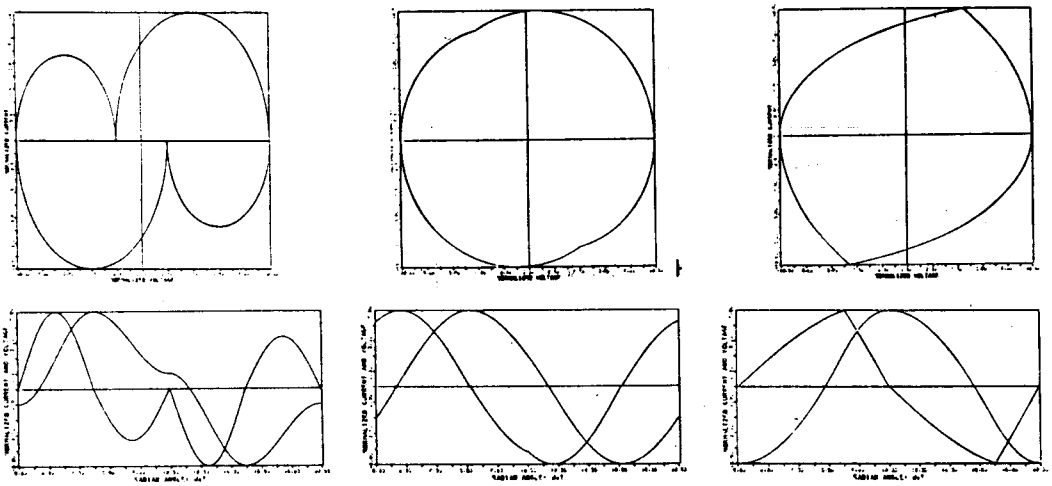

그림 5. 시뮬레이션 결과

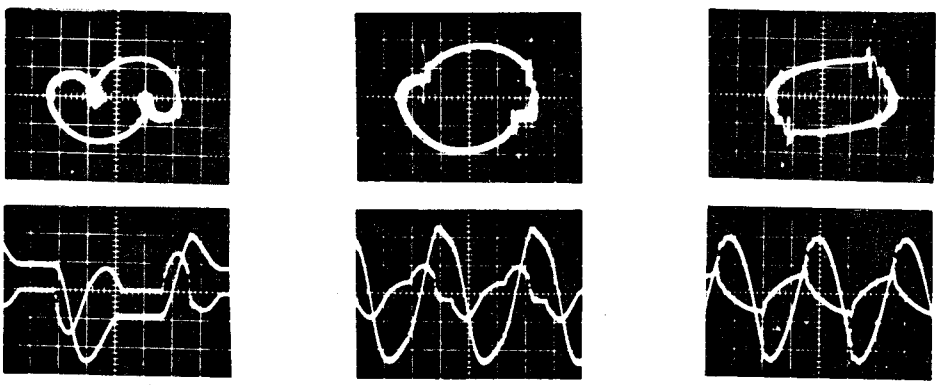

그림 6. 실험결과