

◦김 만고, 한 재원, 은 명중
한국과학기술원, 전기및 전자공학과

A Fast Time Domain Digital Simulation
for the Series Resonant Converter

Mam Go Kim, Jae Won Han and Myung Joong Youn
Dept. of Electrical Engineering, KAIST

ABSTRACT

State-space techniques are employed to derive an equivalent nonlinear recurrent time-domain model that describes the series resonant converter behavior exactly. This model is employed effectively to analyze large signal behavior by propagating the recurrent equation and matching boundary conditions through digital computation. The model is verified with a laboratory converter for a steady-state operation.

1. 서론

직렬 공진형 변환기(SRC)는 높은 효율,경제성,낮은 방사잡음 등의 장점을 갖추고 있을 뿐 아니라 대전력(100kw)에 사용이 가능하여 항공산업에 널리 사용되고 있다. 또한 스위칭 소자가 LC망크의 공진 주파수보다 낮은 주파수에서 동작할때 스위칭 소자의 자연전류가 가능하여 턴 오프 손실이 작고 소자에 대한 스트레스가 감소한다.

지금까지 SRC에 대한 시뮬레이션은 일반적 회로 시뮬레이션 프로그램(예 SPICE)이나 비선형 이산 모델(non-linear discrete model)에 의해 이루어졌다. 일반적 회로 시뮬레이션 프로그램은 정확하나 긴 계산 시간을 요하는 단점이 있다[1-2]. 비선형 이산 모델은 계산 시간은 아주 적으나 정확도면에서 실제와 오차가 큰 편이다[3-4].

이 논문에서 제시된 상태 방정식에 의한 방법[5-6]은 위의 두가지 시뮬레이션 방법의 단점을 보완해 줄 수 있는

시뮬레이션이다. 상태 방정식에 의한 해석 방법은 미선형계를 구분적 선형계(piecewise linear system)로 분해하여 해석함으로써 빠르고 정확한 시뮬레이션을 할 수 있었다. 이 방법은 감마제어기[7-8]뿐 아니라 알파 제어기[9-11]에 대해서도 쉽게 이용 될 수 있으나, 여기서는 감마제어기에 대해서 시뮬레이션하고 유용성을 실험으로 검증하였다.

2. 전력단 모델

(1) SRC의 등가회로와 상태 방정식

그림 1은 반 브릿지(half bridge) SRC의 기본회로를 나타낸다. 이 회로가 동작할 수 있는 가능한 모드는 그림 2에서와 같이 다섯가지로 나뉘어진다. 상태변수를 $x_1=i_L$, $x_2=v_C$, $x_3=v_{C_f}$ 로 잡으면 Q1이 도통상태일때 상태 방정식을 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{X} = AX + BU_1 \quad (1)$$

$$V_o = C_1 X \quad (2)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{L}(R_s + \frac{R_f R_L}{R_f + R_L}) & -\frac{1}{L} & -\frac{R_L}{L(R_f + R_L)} \\ \frac{1}{C} & 0 & 0 \\ \frac{R_L}{C_f(R_f + R_L)} & 0 & -\frac{1}{C_f(R_f + R_L)} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C_1 = \begin{bmatrix} \frac{R_f R_L}{R_f + R_L} & \frac{R_L}{R_f + R_L} \end{bmatrix}$$

$$U_1 = E - 3V_d$$

이고 E_d 는 다이오드에 의한 전압강하를 나타내며 R_s 는 도선에 존재하는 저항을 의미하고, R_f 는 출력 커패시터의 등가 직렬 저항을 나타낸다. 또한, 도통상태에서 트랜지스터의 콜렉터와 에미터 사이의 전압강하는 다이오드와 같다고 가정하였다.

D1이 도통일때 식은 다음과 같다.

$$K_1 \dot{X} = AK_1 X + BU_2 \quad (3)$$

$$V_o = C_2 X \quad (4)$$

여기서,

$$K_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

$$C_2 = \begin{bmatrix} -\frac{R_f R_L}{R_f + R_L} & \frac{R_L}{R_f + R_L} \end{bmatrix}$$

$$U_2 = E + 3V_d$$

Q2가 도통일때 같은 방법으로 상태 방정식을 구할 수 있다.

$$K_2 \dot{X} = AK_2 X + BU_1 \quad (5)$$

$$V_o = C_2 X \quad (6)$$

여기서,

$$K_2 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

D2가 도통일때도 다음과 같이 표현된다.

$$K_3 \dot{X} = AK_3 X + BU_2 \quad (7)$$

$$V_o = C_1 X \quad (8)$$

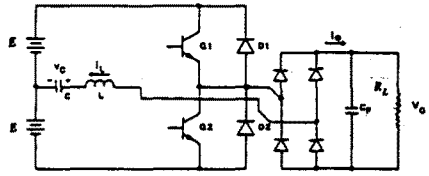
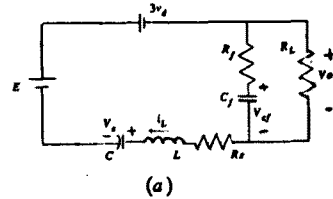
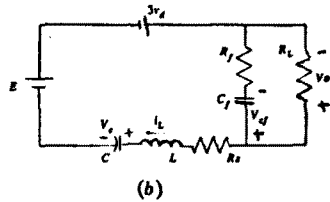


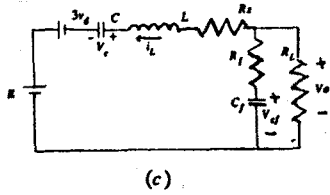
그림 1. 반 브릿지(half bridge) SRC의 기본 회로



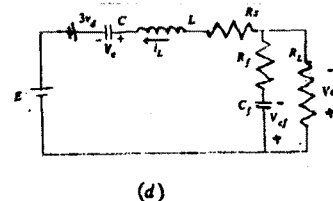
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 2. 각 모드의 등가회로

(a) Q1 도통 상태 (b) D1 도통 상태

(c) Q2 도통 상태 (d) D2 도통 상태

여기서,

$$K_3 = \begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}$$

위의 네가지 모드 외에도 표 1에 표시된 바와같이 출력단 정류기의 다이오드에 역전압이 걸리게 되어 불연속 모드가 발생할 수 있는데, 이때는 공진 전류는 없이고 공진 커패시터

양단 전압은 변화가 없다. 또한, 출력단의 커패시터 전압과 출력전압은 다음과 같다.

$$\frac{dV_{cf}}{dt} = \frac{V_{cf}}{(R_L + R_f)C_f} \quad (9)$$

$$V_o = \frac{R_L}{R_f + R_L} V_{cf} \quad (10)$$

(2) 이산적 상태 방정식의 구성

위에서 구한 모든 식들은 구간적 선형계로 다음과 같은 형태로 표시된다.

$$\dot{X} = AX + BU \quad (11)$$

$$V_o = CX \quad (12)$$

위의 식을 샘플링 간격이 h인 이산적 상태 방정식으로 표현하면,

$$X(kh+h) = FX(kh) + GU(kh) \quad (13)$$

$$V_o(kh) = CX(kh) \quad (14)$$

여기서,

$$F = e^{Ah}$$

$$G = \int_0^h e^{A(s)} ds B$$

가 된다. 위에서 구한 알고리즘은 각각의 모드에 적용할 수 있고 그 결과를 표 2에 제시되었다.

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

그림 1의 SRC의 시뮬레이션에 사용된 파라메타 값은 다음과 같다.

$$E = 34 V \quad V_d = 1 V$$

$$C = 1 \mu F \quad C_f = 87 \mu F$$

$$L = 557 mH \quad R_L = 50 \Omega$$

$$R_s = 5 \Omega \quad R_f = 1 \Omega$$

$$\text{스텝크기}(h) = 2 \mu s$$

그림 3에 시뮬레이션 결과와 실험결과를 나타내었다. 스위칭 주파수 15[kHz]에서 실험결과는 공진전류, 공진 커패시터 전압, 그리고 출력 전압이 시뮬레이션과 일치한다. 출력 필터의 순수한 양단 전압은 직렬 등가 저항의 존재때문에 실제로 측정이 불가능하며 출력 전압만 측정이

스위칭 소자	불연속 조건
Q1	$E - V_c - 3V_d < V_{cf}$
D1	$-E + V_c - 3V_d < V_{cf}$
Q2	$E + V_c - 3V_d < V_{cf}$
D2	$-E - V_c - 3V_d < V_{cf}$

표 1. 각 스위칭 소자의 도통 시작시 불연속 전류인 조건

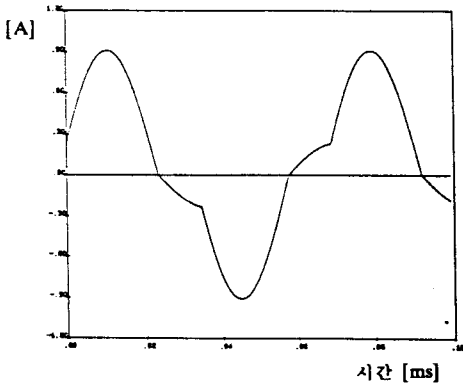
모드	이산적 방정식의 해	
	F	G
Q1 도통 상태	$F_1 = e^{A_1 h}$	$G_1 = \int_0^h e^{A_1(s)} ds B$
D1 도통 상태	$K_1 F_1 K_1$	$K_1 G_1$
Q2 도통 상태	$K_2 F_1 K_2$	$K_2 G_1$
D2 도통 상태	$K_3 F_1 K_3$	$K_3 G_1$

표 2. 각 모드에 대한 이산적 방정식의 해

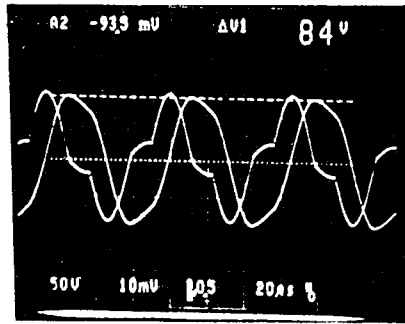
가능하다.

4. 결론

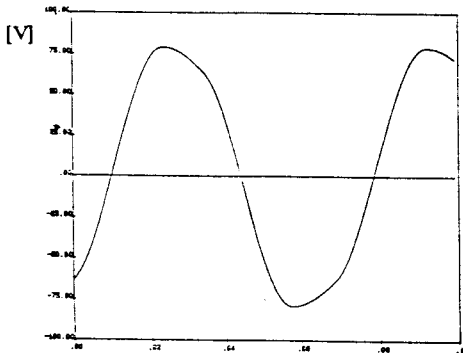
상태 방정식에 의한 해석방법으로 비선형 시스템을 각 모드에 대한 구분적 선형계로 분해하여 시뮬레이션 할 수 있었다. 이 방법에 의해 출력 전압의 DC값 뿐 아니라 맥동 파형까지 시뮬레이션 할 수 있었고 각각의 파형은 실험을 통해 증명 할 수 있었다. 또한 이 방법은 감마 제어기 뿐 아니라 알파제어기에 대해서도 쉽게 이용할 수 있다.



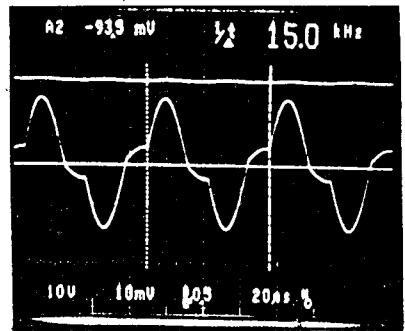
(a)



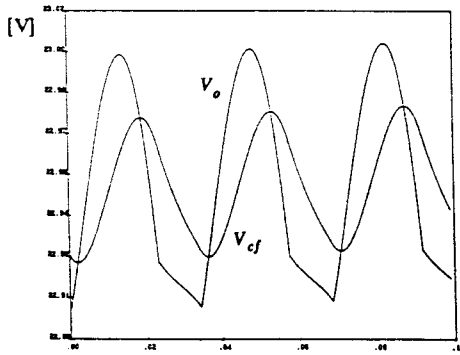
(d)



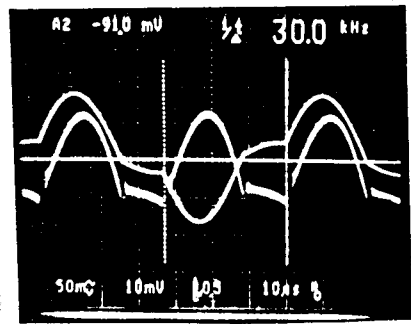
(b)



(c)



(c)



(f)

그림 3. 스위칭 주파수 15[kHz]에서 전압 전류 파형의 시뮬레이션 결과 (a)-(c) 및 실험 결과 (d)-(f)

(a) 공진 전류 파형(i_t) (b) 공진 커패시터 전압파형 (v_c) (c) 출력 파형(V_o)과 출력 커패시터 파형(V_{cf}) (d) 공진 전류파형(0.5A/div) 및 커패시터 전압 파형 (e) 공진 전류 파형 및 출력 전압의 DC값 (f) 공진 전류 파형 및 출력 전압의 백등(50mV/div)

참고 문헌

- [1] M. P. Dougherty, "A series resonant inverter simulation using super-sceptre," The Proceedings of the National Aerospace and Electronics Conference ,pp. 517-524, 1979
- [2] R. L. Avant and F. C. Lee, "The J3 SCR model applied to resonant converter simulation," IEEE Transactions on Industrial Electronics,vol. IE-32, pp. 1-12,1985
- [3] R. J. King and T. A. Stuart, "A large signal dynamic simulation for the series resonant converter," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems,vol. AES-19,pp.859-870,1983
- [4] R. J. King and T. A. Stuart, "Small-signal model for the series resonant converter," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic systems,vol. AES-21,pp. 301-319,1985
- [5] F. C. Lee and Y. Yu, " Computer-aided analysis and simulation of switched dc-dc converters," IEEE Trans. Ind. Appl.,vol. IA-15, pp. 511-520,1979
- [6] S. S. Kelkar and F. C. Lee, "A fast time domain digital simulation technique for power converters: applied to a buck converter with feedforward compensation," IEEE Transactions on Power Electronics,vol. PE-1,pp. 21-31,1986
- [7] V. Vorperian and S. Cuk, "A complete DC analysis of the series resonant converter, "IEEE Power Electronics Specialists Conference,pp. 85-100,1982
- [8] 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, pp. 820-830,1983
- [9] F. C. Schwarz, "A method of resonant current pulse modulation for power converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation,vol. IECI-17,pp. 209-221,1970
- [10] F. C. Schwarz, "An Improved method of resonant current pulse modulation for power converters," IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation,vol. IECI-23,pp. 133-141,1976
- [11] F. C. Schwarz and Klaasens, " A 95-percent efficient 1-kw DC converter with an internal frequency of 50 kHz," IEEE Transactions on Industrial Electronics and Control Instrumentation,vol. IECI-25, pp. 326-333,1978