

*
현 동 석 이 택 기 안 성 찬
한 양 대 학 교 전 기 공 학 과

DELTA MODULATED CURRENT REGULATOR FOR RESONANT LINK INVERTER

*
Hyun Dong-Seok Lee Taeck-Gi Ahn Sung-Chan

Hanyang University. Dept. of Electrical Eng.

Abstract

The introduction of resonant link inverters has allowed the use of much higher switching frequencies in induction motor current regulators. The resonant link inverter, however, requires the use of discrete time switching strategies. This type of controller, while giving the best possible performance, is difficult to implement, since motor parameters must be calculated or measured. The delta modulated current regulator (DMCR) has been introduced as a controller without additional state feedback. A discrete pulse modulated current regulator which controls load current is introduced in the paper.

I. 서 론

Current Regulator에서 스위칭 주파수를 높이면 용량 전류의 위상 지연과 고조파 전류가 감소되기 때문에 Current Regulator의 대역폭이 확장되며 Reactive Filter성분의 용량이 감소되는 효과를 얻을 수 있다. 또한 가성주파수 이상으로 스위칭 주파수를 선택하면 Current Regulator의 발생 소음을 제거할 수 있게 된다. 이와 같은 스위칭 주파수 증가의 필요성으로부터 공진형 인버터의 개념이 제안되었다[1]. 공진형 인버터는 기존의 PWM 인버터에 L, C 공진 회로를 추가하여 DC link 전압을 공진시켜서 공진 전압의 Zero Voltage에서 스위칭 동작을 할 수 있도록 구성한다. Zero Voltage Switching 방식으로 인버터의 높은 스위칭 주파수 운전이 가능하며 스위칭 손실이 제거되므로 인버터 효율이 향상될 뿐만 아니라 냉각 장치가 간소화 된다. 그림 1a.는 공진형 인버터의 회로도이고 그림 1b.는 저주파 AC파형이다. 이러한 공진형 인버터는 DC link 전압이 영인 순간에 스위칭 함으로써 스위칭 순간은 공진 주기를 Sampling 시간으로 하는 Discrete한 시간 함수가 된다.

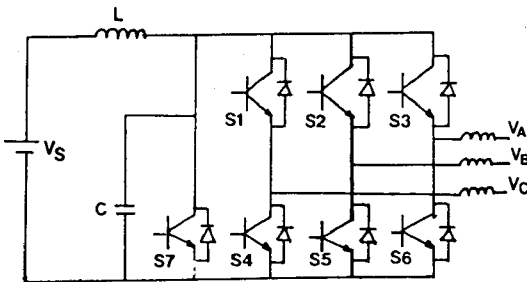


그림 1a. 공진형 인버터의 회로도

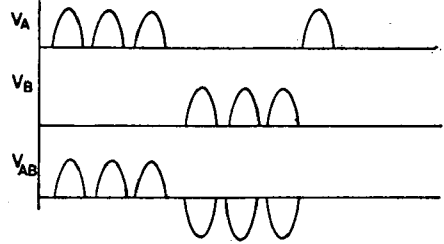


그림 1b. 저주파 AC 파형

본 논문에서는 부하 전류만의 상태 귀환을 하는 Discrete Time Current Regulator를 수행하고자 하며 시뮬레이션을 통하여 Delta Modulated Current Regulator의 성능을 규명한다.

II. 공진회로의 분석

그림 1a.에서 공진형 인버터의 동작은 스위치 S7을 짧은 시간 동안 on 시킴으로써 시작된다. 초기 조건이 만족되어 S7을 off 시키면 DC link 전압이 공진하기 시작하여 공진 전압이 영이 될 때 S7을 다시 on시켜 제 초기화 한다. 이 과정을 반복한다. S7의 도통 기간에 어떠한 스위칭 손실도 없이 S1-S6이 on 이나 off 되어진다. 그림 1a.는 다음과 같은 등가 회로로 나타낼 수 있다. 여기서 모터의 인덕터가 공진 인덕터 Lr보다 상당히 크므로 인버터 입력 전류 Id는 일정하다고 가정 하였다.

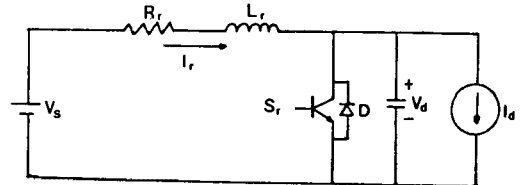


그림 2. 공진시의 등가 공진 회로도

스위치 S_r을 통하여 인덕터 L_r에 양의 초기 전류 I_m이 주어진다. 공진 커패시터 전압 V_d는 공진 인덕터 전류 I_r과 인버터 입력 전류 I_d의 차에 의해 결정된다. 인덕터 전류가 I_m이 되었을 때 스위치 S_r을 off 시키면 공진시의 커패시터 전압 V_d와 인덕터 전류 I_r은 다음 식과 같다.

$$V_s(t) = I_r(t)R_r + L_r \frac{dI_r(t)}{dt} + V_d(t) \quad (1)$$

$$I_r(t) = I_d(t) + C_r \frac{dV_d(t)}{dt} \quad (2)$$

여기서 초기 조건은 $V_d(0)=0$, $I_r(0)=I_m$ 이다.
 (1),(2)번 식을 초기 조건을 대입하여 풀면 다음과 같다.

$$V_d(t) = (V_s - I_d R_r) \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 - \xi^2}} \sin(\omega t + \theta) \right] + \frac{(I_m - I_d) Z_r}{\sqrt{1 - \xi^2}} e^{-\alpha t} \sin(\omega t) \quad (3)$$

$$I_r(t) = I_d + e^{-\alpha t} \left[(I_m - I_d) \cos(\omega t) + \frac{2V_s - (I_d + I_m) R_r}{2\omega L_r} \sin(\omega t) \right] \quad (4)$$

여기서

$\omega r = 1/\sqrt{L_r C_r}$: 공진 주파수

$\alpha = R_r/2L_r$: 감쇠율

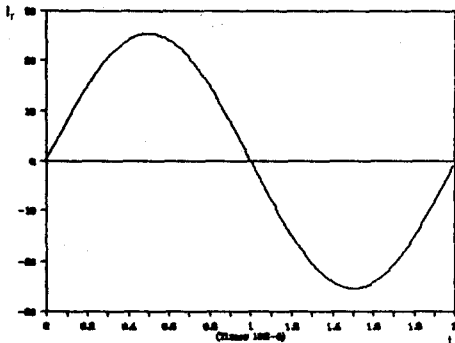
$\xi = R_r/2Z_r$: 계동비

$Z_r = \sqrt{L_r/C_r}$: 특성 임피던스

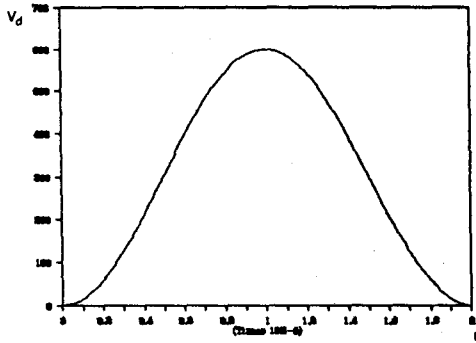
$\omega = \omega r \sqrt{1 - \xi^2}$: 진동 주파수

$\theta = \cos^{-1} \xi = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1 - \xi^2}}{\xi} \right)$: 위상

(3)번 식에서 V_d 가 영으로 되는 것은 $I_m - I_d$ 에 관계 좌우를 알 수 있다. 따라서 $I_m - I_d$ 가 적절한 값이 되었을 때 스위치 S_r 을 off하는 제어가 필요하다. 그림 3.은 공진시의 전류와 전압 파형이다.



(a) 공진시 전류 파형



(b) 공진시 전압 파형

그림 3. 공진시 전압과 전류 파형

III. DELTA MODULATED CURRENT REGULATOR

[A] VSI Current Regulator의 원리
 VSI Current Regulator는 모터 부하를 지나는 전압원의 스위치를 제어함으로써 부하 전류를 제어한다. 3상 평형 부하를 가진 시스템은 그림 4.의 등가 회로로 간단히 나타낼 수 있다.

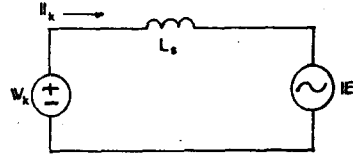


그림 4. VSI 유도기 운전의 간단한 복소 등가회로

여기서 3상 부하 전류 i_a, i_b, i_c 와 역기전력 E_a, E_b, E_c 는 다음의 식으로 나타낼 수 있다.

$$W = \frac{2}{3}(i_a + a i_b + a^2 i_c) \quad IE = \frac{2}{3}(E_a + a E_b + a^2 E_c) \quad \text{이 고 } a = e^{j2\pi/3} \text{ 이다.}$$

인버터의 6개의 스위치에는 8개의 스위치 조합이 있다.

표. 인버터의 스위칭 상태

	0	1	2	3	4	5	6	7
Sa	1	1	1	0	0	0	1	0
Sb	1	0	1	1	1	0	0	0
Sc	1	0	0	0	1	1	1	0

여기서 1은 해당 스위치가 도통한 경우이고 0은 아랫단 스위치가 도통한 경우이다.
 스위치 상태 k에 대응되는 전류 벡터의 식은

$$\Delta W_k = \frac{W_k - IE}{L_s} \Delta t \quad \text{가 된다.}$$

[B] Delta Modulated Current Regulator

DMCR은 Discrete Pulse Current Regulator의 한 종류로서 여러 문헌에서 소개되었다 [2][3].
 그림 5.는 DMCR의 블록 선도이다.

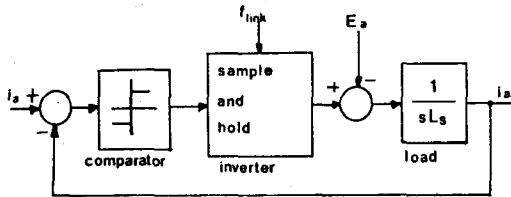


그림 5. DMCR의 블록 선도

DMCR은 부하 전류만의 상태 귀환을 가지고 있는 Zero Hysteresis Discrete Time Switching Regulator이다. Current Regulator는 역기전력의 영향을 제거하기 위해 무한대의 이득을 가진다. 또한 DMCR은 위포의 0번과 7번에 해당하는 Zero States를 선택하지 않는다. 그러므로 이것은 실제 전류 벡터가 가능한 한 빠르게 기준 전류 벡터를 향해 가도록 스위칭한다. 그 스위칭 다이어그램이 그림 6에 있다.

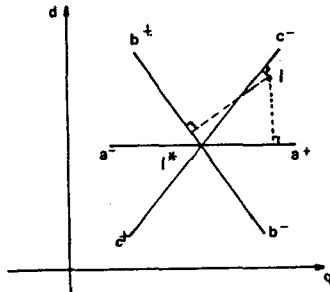
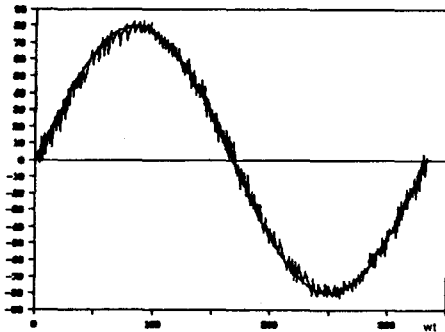
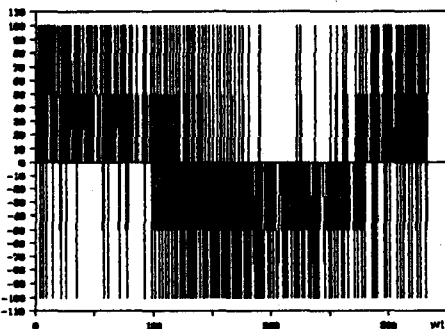


그림 6. 스위칭 다이어그램

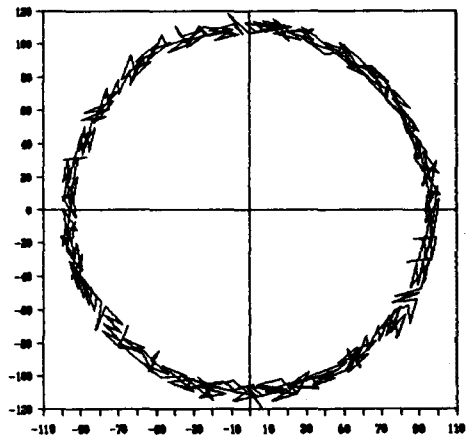
IV. 시뮬레이션 결과



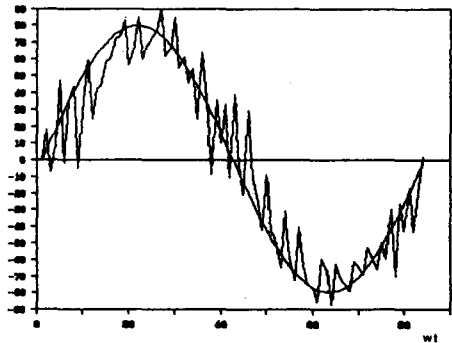
(a) 부하 전류 \$i_a\$와 기준 전류 \$i_a^*\$, \$f_{sw}=20Khz\$



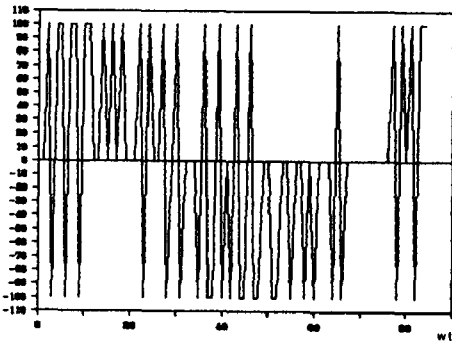
(b) 스위칭 함수 \$f_{sw}=20Khz\$



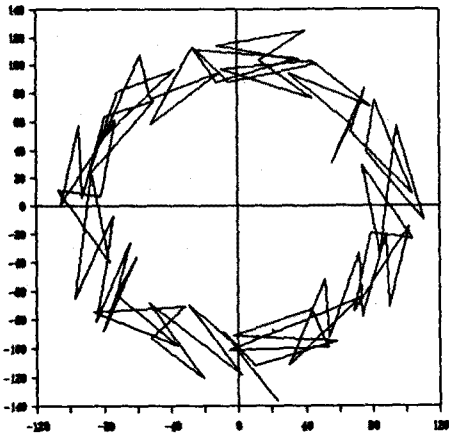
(c) 전류 벡터, \$I_a\$와 \$I^*\$, \$f_{sw}=20Khz\$



(d) 부하 전류 \$i_a\$와 기준 전류 \$i_a^*\$, \$f_{sw}=5Khz\$



(e) 스위칭 함수 \$f_{sw}=5Khz\$



(f) 전류 벡터, I 와 I^* , $f_{sw}=5KHz$

그림 5. Delta Modulated Current Regulator의 파형

V. 결 론

이 논문은 공진형 인버터에 적합한 Delta Modulated Current Regulator를 보여 주었다. 이 DMCR은 부하 전류만의 귀환을 받아 기존 입력 전류로 파르게 추종하도록 한다. 그러므로 모버 역기전력이나 인덕턴스의 계산을 요구하지 않는다. DMCR은 기존의 PWM시스템보다 4-5배 빠른 스위칭을 하는 공진형 인버터에 적합한 제어 방식이다.

VI. 참고 문헌

- [1] D.M.Divan " The resonant DC link converter A new concept in static power conversion " IEEE-IAS Conference Record 1986 pp640-647
- [2] M.Keraluvara and D.M.Divan " Delta Modulation strategies for resonant link inverters " PESC Conference Record June 1987 pp271-278
- [3] Thomas G.habeter and D.M.Divan " Performance characterization of a new discrete pulse modulated current regulator " PESC Conference Record 1988 pp395-405
- [4] Jin-Sheng Lai and Bimal K. Bose " An improved resonant DC link inverter for induction motor drives " PESC Conference Record 1988 pp742-748