

공진 DC Link 순시 정현파 전류 추종형  
인버터를 이용한 유도전동기 제어시스템

유 권 중

( 한국동력자원연구소 )

Instantaneous sinusoidal current tracking mode  
inverter with quasi-resonant Link in DC side

Yu, Gwon-Jong

( Korea Institute of Energy and Resources )

Abstract :

In this paper describes the feasibility study on a single-phase / three-phase voltage-fed inverter using IGBTs, incorporating voltage-mode quasi-resonant DC Link and the instantaneous Sinusoidal Current tracking adaptive control implementation under zero voltage switching restriction.

The simulation and experimental results are shown here and discussed for single-phase voltage-fed and three-phase voltage-fed inverter in order to verify the new operating principle of the inverter topology proposed here.

1. 서 론

최근 인버터 제어에 있어서 인버터 스위칭 주파수는 전력용 반도체 소자의 진보와 함께 고주파화 되고 있다. 고주파 스위칭을 교류전동기 가변속 제어 시스템에 이용할 때의 이점으로서는

- i) 고조파를 감소시킨다.
- ii) 리플전류를 감소시켜 전동기 토오크 리플이나 발열을 억제할 수 있다.
- iii) 자기 소음을 억제 할 수 있다.
- iv) 제어성능의 향상 등을 들 수 있다.

그런데 현재 범용 인버터로서 대부분을 차지하고있는 전압형 PWM 인버터에는 다음과 같은 문제점을 안고있다.

- i) PWM 제어에 기인하는 전동기의 자기소음
- ii) 인버터 arm(암) 단락방지 시간  $T_d$  에 의한 나쁜 영향
- iii) 누설전류, 고주파화에 의한 스위칭 손실의 증대
- iv) 스너버 회로에 의한 손실

이러한 문제점들에 대한 여러가지 대책이 보고되고 있지만 근본적인 대책이라고는 할 수 없다.

본 논문에서는 공진원리를 이용하여 Zero 전압스위칭 제어를 함으로써 iii), iv) 의 스위칭손실과 스너버손실을 영으로 함과 동시에 i), ii) 의 대책이라고는 할 수 있는 공진 DC Link 인버터를 AC 전동기 가변속시스템에 적용 하였다.

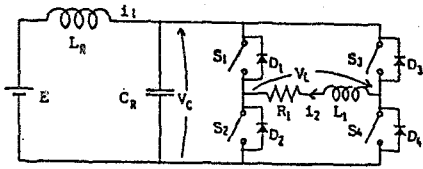
먼저 공진 DC Link 의 원리를 설명한후 단상 및三相 순시지 전류 추종제어형 인버터에 확장하여 시제작 실험 결과와 시뮬레이션 결과를 비교, 검토하여 전력변환기의 고주파화에 대해서 유효하다는 것을 기술하고 있다.

2. 공진 DC Link 인버터

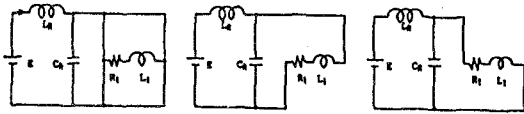
공진원리를 이용하여 전압형 인버터를 구성하면 <그림 1> 과 같이 나타난다. 일반의 Full Bridge 전압형 인버터와 구조상 서로 다른것은 전원과 인버터 사이에 공진회로가 존재한다는 것이 서로 다르다. <그림 1> 의 인버터 회로동작 Mode 는 <그림 2> 와 같이 3 개의 동작 Mode 가 존재한다.

<그림 3> 은 캐패시터  $C_R$  의 전압  $V_c$ , 공진인버터  $L_R$  의 전류  $i_L$ , 부하 전압  $V_L$ , 전류  $i_a$ , 전류  $i_o$  의 파형 및 스위칭 시퀀스를 나타내고 있다. 그림중의 (1)~(3) 은 각각 <그림 2> 의 동작회로 Mode 의 번호와 같다. 일반의 PWM 인버터의 스위칭과 서로다른것은 전 스위치가 ON 으로는 캐패시터 단락 Mode 가 존재한다는 것이다.

캐패시터 단락 Mode 는  $V_c$  가 정확하게 Zero Cross 하기 위해서는 절대적으로 필요한 mode 이다. 이와같이 상하 양 스위치가 ON 하는 캐패시터 단락모드를 적극적으로 이용하므로 Dead Time 을 고려할 필요가 없다. 이



<그림 1> 공진 DC Link 인버터

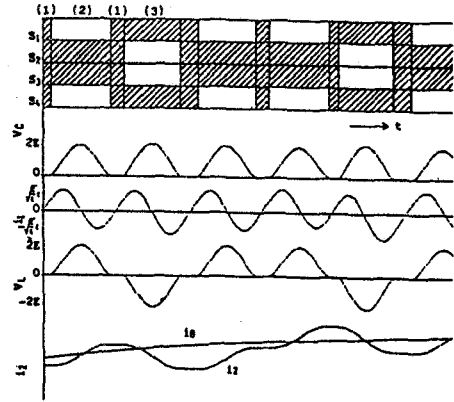


(1) Mode 1 (2) Mode 2 (3) Mode 3

<그림 2> 회로 동작 Mode

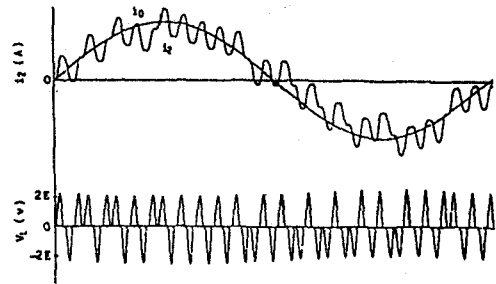
하에서 본 인버터의 동작을 설명한다. 먼저 캐패시터 단락 Mode 1 을 선택하면  $i_1$  이 단조 증가 한다. 그후 어느정도의  $i_2$  이 증가하면 Mode 2, 3 을 선택하게 되는데 어느쪽을 선택할 것인가는 공진전압  $V_c$ 가 Zero Cross 할때의 부하전류  $i_x$  와 기준전류  $i_0$  의 크기를 비교하여  $i_x > i_0$  이면 Mode 2,  $i_x < i_0$  이면 Mode 3을 선택한다. Mode 2, 3 으로 바뀌면 주기  $\frac{1}{2\pi\sqrt{L_r C_r}}$  로써 공진이 시작되어 이 공진기간 중에 부하전류가 증감한다. 공진전압의 Peak 는 전원전압의 2배 이상으로 되어 Mode 를 바꿀 때마다 Peak 치가 변동한다. 이것은 공진기간중에 부하에서 공진용 캐패시터에 전류가 흐르기 때문이다. 이 Peak 치의 변동은 공진회로와 부하에 의해서 결정된다. 공진후 캐패시터 전압이 Zero Cross 하면 인버터의 역방향 다이오드가 ON 으로 되어 캐패시터 단락 Mode 가 된다. 역방향 다이오드에 흐르는 전류가 감소하여 역으로 되었을때 전 스위치를 ON 시켜  $i_1$  을 단조증가시킨다. 그러므로 특별히 fast recovery 다이오드 필요로 하지않고 MOSFET 및 IGBT 의 내장 다이오드가 유효하게 사용된다.

또한 전 스위치를 Turn ON 시켰을때에는 캐패시터 전압이 Zero 이기 때문에 손실이 없으면 그리고, Mode 2, 3 이 선택되면 스위치 S1, S4 아니면 S2, S3 가 Turn OFF 되는데 이때 스위치에는 공진전압이 걸리므로 인하여  $dv/dt$  가 적으며 스너퍼 회로가 불필요하다. 그러므로 Turn off 의 손실이 종래의 전압형 PWM 인버터보다 크게



<그림 3> 회로의 스위칭 Sequence

줄어든다. 이상으로부터 인버터 출력전압과 부하전류는 <그림 4> 와 같이되며 이것은 Delta 변조방식이라 한다.

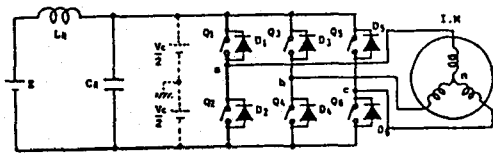


<그림 4> Delta - Modulation

### 3. 공진 DC Link 3상 인버터

앞에서 설명했던 공진 DC Link 인버터를 3상 인버터로 확장시켜 부하로서 유도전동기라고 할때 회로 구성은 <그림 5> 와 같이 된다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 3상 전압형 인버터와 틀린점은 공진회로가 존재 한다는 것이기 때문에 공진 DC Link 인버터로 쉽게 치환할 수 있다.

설명하기 쉽게 하기 위하여 그림과 같이 DC Link 전압 및 유도 전동기의 중성점을 0, n 으로 가정하고 각상의 부하전류를  $i_a, i_b, i_c$  기준전류를  $i_{a0}, i_{b0}, i_{c0}$  라고 하여 일례로서  $i_a < i_{a0}, i_a > i_{a0}, i_c < i_{c0}$  일때를 생각한다. 이때의 Mode 는 <표 1> 에 나타낸바와 같이  $i_a, i_c$



<그림 5> 공진 DC Link 3상 인버터

는 증가, ib 를 감소시키는 Mode 7에 해당된다.

<그림 5> 를 고정 d - q 축에 의한 유도 전동기의 전압방식은

$$\frac{d}{dt} \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} = \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -L_s R_r & -L_s L_r \lambda \omega & MR_s & 0 \\ L_s L_r \lambda \omega & -L_s R_r & 0 & ML_s \lambda \omega \\ MR_s & 0 & L_r M \lambda \omega & -R_s L_r \\ -ML_s \lambda \omega & MR_s & -M^2 \lambda \omega & -R_s L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \\ i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} + \frac{1}{\Delta} \begin{pmatrix} -M & 0 \\ 0 & -M \\ L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{pmatrix} \quad (1)$$

로 된다. 단,  $R_r, R_s$  : 회전자, 고정자의 전선저항  
 $L_r, L_s$  : 회전자, 고정자의 인덕턴스  
 $M$  : 상호 인덕턴스의 최대치  
 $\lambda$  : 극대수

캐패시터 단락 Mode (Mode 1) 에서는

$$\begin{aligned} L_d \frac{di_d}{dt} &= E \\ v_c &= 0 \\ v_{ds} = v_{qs} = v_{cs} &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

로 되어 전 Mode 에 대해서 <표 1> 에 나타내고 있다.

단, <표 1> 의  $i, K_a, K_b, K_c$  는

$$C_d \frac{dv_c}{dt} = i, +1 \quad (3)$$

$$v_{ds} = \frac{K_a}{2}, \quad v_{qs} = \frac{K_b}{2}, \quad v_{cs} = \frac{K_c}{2} \quad (4)$$

또 스위치 S (A, B, C) 는 각 Arm 의 상부 스위치 (1, 3, 5) 가 Turn ON 할때 1 로 하고 하부 스위치 (2, 4, 6) 이 Turn ON 할때를 0으로 하였다.

이상의 식(1), (3), (4) 을 연립시킨 식이 본 논문의

<표 1> 3상 인버터의 동작 Mode

Mode	$i_1 - i_{2s}$	$i_1 - i_{3s}$	$i_1 - i_{4s}$	Switch S (A, B, C)	聯分方程式 I	Inverter 聯分式 $K_a, K_b, K_c$
1	Capacitor short mode			All switch OFF	—	0 0 0
2	+	+	+	S (0, 0, 0)	0	-1 -1 -1
3	-	+	+	S (1, 0, 0)	-1.	1 -1 -1
4	+	-	+	S (0, 1, 0)	-1.	-1 1 -1
5	-	-	+	S (1, 1, 0)	1.	1 1 -1
6	+	+	-	S (0, 0, 1)	-1.	-1 -1 1
7	-	+	-	S (1, 0, 1)	1.	1 -1 1
8	+	-	-	S (0, 1, 1)	1.	-1 1 1
9	-	-	-	S (1, 1, 1)	0	1 1 1

Dynamic model 식이다.

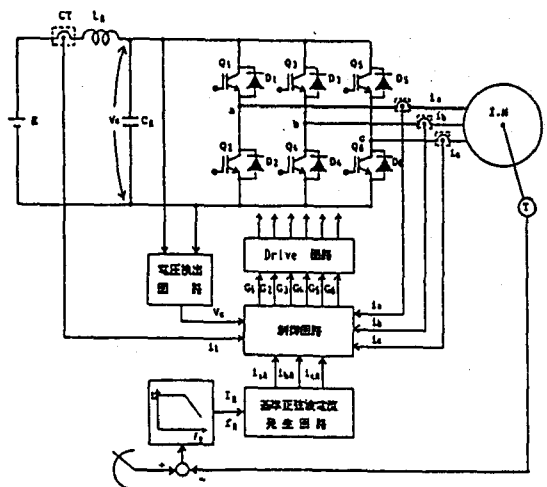
4. 시뮬레이션 및 실험결과

본 논문에서는 필자가 제안한 공진 초기치 전류 일정 제어방식을 적용하여 3상 인버터 구동 유도 전동기 가변속 시스템을 <그림 6> 과 같이 구성하여 시계각 실험하였다.

공진회로의 인덕턴스, 캐패시터, 공진 주파수는 각각  $L_r = 27 [\mu H]$ ,  $C_d = 0.402 [\mu F]$ ,  $F_{res} = 48.3 [kHz]$  로 하고 공진 초기치 전류  $I_{TH} = 15 [A]$  로 하였으며 유도 전동기 용량은 1 kW의 농형 유도전동기를 사용하였다.

<그림 7> 은 인버터 출력의 선간 전압과 부하전류의 시뮬레이션 파형을 나타내고 있다.

<그림 6> 의 시스템에 있어서 제어회로는 캐패시터

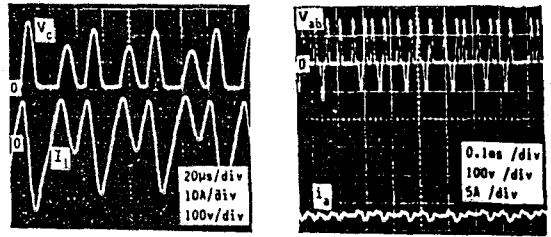


<그림 6> 공진 DC Link 순시 정현파 전류 추종 제어형 인버터를 이용한 유도전동기 구동시스템

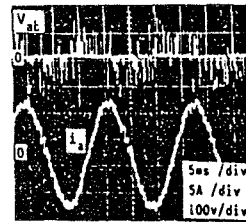
단락 mode 판별회로와 스위칭 pattern 선택회로로 크게 나누어지며, <그림 7>에 전압 Zero Cross 검출 회로를 포함한 상세한 제어회로의 구성을 나타내고 있다.

<그림 9>와 <그림 10>에 시제작 시스템에 있어서 동작파형을 나타내고 있다. DC Link 전압  $V_c$ 를 보면 지속적으로 공진을 계속하고 있으며 언제나 Zero Cross 전압에서 주파수 45 kHz 스위칭을 하고 있다는 것을 알 수 있다. <그림 10>의 파형으로부터 알 수 있듯이 일반 PWM 인버터 출력 전류와 동일하게 부하전류가 양호하게 추종하고 있다.

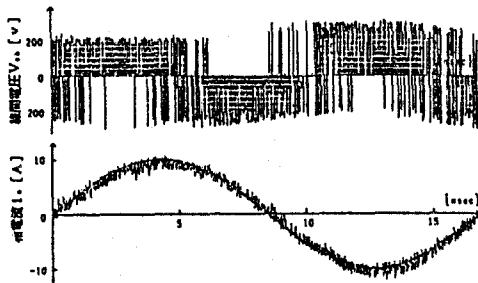
스위칭 손실면에 있어서도 비 공진형 스위칭의 경우 1 주기당 1.378 [ $\mu$ J] 공진형 스위칭의 경우 1 주기당 5.72 [ $\mu$ J] 이 측정되었으며 스위칭 주파수 50 kHz 에서 손실은 비 공진형 스위칭의 경우 68.9[W], 공진형 스위칭의 경우 0.286[W] 가 측정되었다.



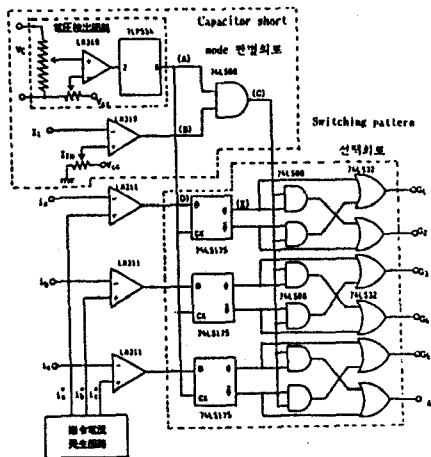
<그림 9> 공진전압파형과 인버터 출력파형



<그림 10> 부하전류와 선간전압 파형



<그림 7> 인버터 출력 선간전압과 부하전류



<그림 8> 제어회로 및 전압검출회로

5. 결 론

본 논문에서는 전압형 PWM 인버터 입력력에 LC 직렬 공진 회로를 접속함으로써 Zero Cross 전압 스위칭을 하는 전압공진 DC Link 순시치 전류 추종 제어형 인버터를 제안 하였다.

이하에 본 논문의 내용 및 결과를 정리하면

- (1) 공진 DC Link 인버터의 원리에 대하여 설명하고 이 방식이 고주파 스위칭 베이스 인버터의 이점을 살려
  - i) Turn ON 시의 손실을 Zero 로 함과 동시에 Turn off 의 손실을 아주 적게 억제
  - ii) 스너버 회로가 불필요
  - iii) Dead Time 의 고려가 불필요
  - iv) 일반의 전압형 인버터에 쉽게 치환이 가능
 등을 명확하게 하였다.
- (2) 스위칭 은 시간 결정법으로서 공진 초기 전류 일정 제어방식을 고안하여 제어회로를 설계하였다.
- (3) 공진 DC Link 형과 비공진 스위칭 손실을 측정하여 실제로 공진 DC Link 형이 손실이 지극히 적다는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

( 1 ) K.S.Rajashekara 他: Resonant DC Link Inverter-fed AC Machines Control, IEEE PESC'87 p.491-498