

공진 DC-Link 인버터의 공진 초기전류의 보상에 관한 연구

곽동걸* 서기영* 권순걸* 이현우* 우정인**
*경남대학교 **동아대학교

Resonance initial current compensation for Resonant DC-Link inverter

*Dong-Kuri Kwak *Ki-Young Suh *Soon-Kurl Kwon *Hyun-Woo Lee **Jung-In Woo
*Kyung-Nam University **Dong-A University

Abstract

This paper proposes a control technique to obtain high frequency quasi sinusoidal DC-Link waveform permitting zero-voltage-switching(ZVS). This operation results in reduction of commutation stress and switching losses in the power devices because they cause no switching loss in principle. But in existing control methods, the resonant capacitor voltage is not frequently made of zero-cross oscillation.

We propose an optimum control strategy which can sustain oscillation and keep the capacitor voltage at an allowable level. Some experimental results are included to confirm the validity of the analytical results.

1. 서론

최근 사용되는 인버터의 응용범위가 높은 효율과 저소음화, 제어장치 성능향상, 반도체 전력변환 장치의 소형화로 인하여 인버터의 스위칭 주파수의 증가가 요구되었으며, 스위칭 손실이 증가하고 따라서 스위칭 소자의 온도가 상승되어 소자의 파괴를 초래하게 된다.

이 문제를 해결하기 위해 최근 활발히 연구되고 있는 영전압 스위칭 (ZVS, Zero-Voltage-Switching)에 의한 스위칭 소자의 손실을 최소화시키고 유사 정현파를 발생시키는 공진형 DC-Link 인버터에 주목되고 있다.

여기에 따르는 문제점으로는 공진용 리액터내의 저항분과 부하측 회로의 제동효과에 의해 공진용 콘덴서 양단 전압이 영 크로스 되지않는다는 점이다. 이것에 관점을 두어 본 논문은 공진링크의 손실과 부하측의 손실에 영향을 미치는 것들을 고려한 두개의 등가회로를 도입하여 이들의 회로방정식을 해석하여 최적 초기전류를 산정하고 여기에 따른 보상 전류를 공진 링크부에 흘러 보내어 이상적인 공진을 실현시켜 콘덴서 양단 전압을 영 크로스 되게하여 영 전압 스위칭

을 이루게 하는 것이다. 그리고 실험결과를 통하여 본 논문의 해석의 타당성을 입증하였고, 기존의 PWM 방식과 비교해서 스너버 회로의 불필요, 방열장치의 간소화, 스위칭 소자에 스트레스의 완화 등의 잇점들이 주어졌다.

2. 공진 DC Link 인버터의 기본동작과 제어방법

공진회로를 그림 2-1과 같이 표시하면 전압형 인버터의 입력측에 공진회로를 설계하고 인버터의 스위칭을 콘덴서 전압과 동기시켜 0[V]일때만 IGBT를 제어한다.

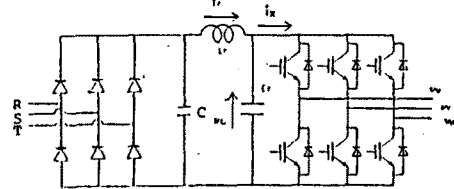
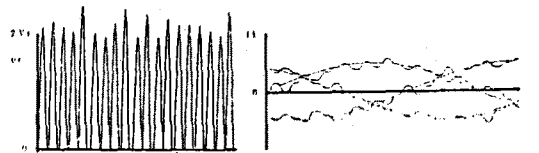


그림 2-1. 공진 DC Link 인버터의 기본구성

Fig.2-1. Basic system of Resonant DC Link inverter

이 방식은 콘덴서 전압이 영 크로스 되고 있을때의 부하 전류 지령과 부하전류를 비교해서 부하전류 지령값이 크면 상측 IGBT를 온하고, 부하전류의 값이 크면 하측 IGBT를 온하며 전류를 제어한다. 일정한 리액터 전류의 초기값을 가할때 3상분 부하전류 지령과 부하전류 및 콘덴서 전압 결과류 그림 2-2에 표시한다.



(a) 콘덴서 전압 (b) 부하전류 지령과 부하전류

그림 2-2.

Fig.2-2. (a) Condenser voltage (b) Load command current and Load current

공진을 지속시키기 위한 방법으로 공진 개시에 있어 공진

리액터의 초기전류값을 제어하면 된다.

이 초기전류의 제어는 공진콘덴서 전압이 영으로 되는 상태에서 인버터의 암을 이용하여 공진콘덴서를 단락시켜 이 기간을 조정하여 이룬다. 즉, 직류전원과 공진리액터에서 이루어지는 폐로를 형성시켜 공진리액터의 전류가 공진 지속 상태를 지킴에 필요한 초기값을 전송할 때 까지 이 상태를 유지하는 것에 따라서 공진링크의 제어를 한다.

공진지속 상태를 유지하기 위해서 중요한 조건이 되는 것은 그림 1에 표시한 인버터 입력전류 i_x 가 가장 크게 되는 경우에 있어서도 공진지속 상태를 잃지 않게 초기전류를 설정하는 방법에 있다. 또한 공진 DC Link는 인버터를 통해 부하측으로 전력을 보내기 때문에 이 상태에서는 공진상태가 감쇄하고 콘덴서 전압이 영 크로스 되지 않으므로 스위칭 손실이 발생하고 공진 DC Link 인버터 방식의 정상적인 동작이 되지 않는다.

3. 이상적인 공진 링크의 최적 초기전류

공진링크내의 전력손실을 무시하고 부하의 리액터 성분을 크게하면 인버터와 부하는 정전류원으로 볼 수 있기 때문에 동기회로는 그림 3-1로 도시된다.

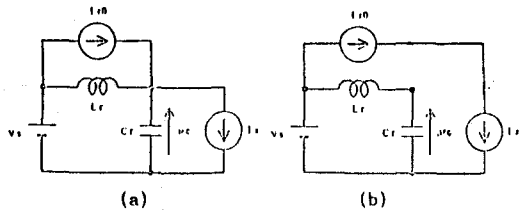


그림 3-1. 이상적인 공진 링크의 동기회로

Fig.3-1. Equivalent circuits of ideal Resonant Link

전류원 I_{ro} 는 공진리액터의 초기전류이며 i_x 는 인버터 전류이다. 이들의 대소관계에서 먼저,

$$I_{ro} = I_x \dots \dots \dots (3-1)$$

로 되면 그림 3-1(b)로 되어 이상적인 공진회로의 동작으로 귀착됨을 보여준다.

인버터 입력전류 i_x 가 리액터 전류의 초기값 I_{ro} 보다 클 경우는 그림 2-1에 표시한 인버터의 전력변환 소자와 역병렬로 접속된 다이오드가 온하여 공진리액터와 직류전원으로 폐로가 형성되어 리액터 전류와 인버터 입력전류와 같게 될 때 까지 공진리액터 전류가 점점 증가한다.

결국 이 경우에는 인버터 입력전류와 리액터 전류 초기값과 같게 된다. 또 리액터 전류의 초기값이 인버터 입력전류보다 클 경우에는 콘덴서 전압이 직류 전원전압의 2배보다 크게 된다. 이외값이 리액터 전류의 초기값을 인버터 입력 전류와 같게 하면 최적인 공진상태를 실현시킬 수 있으나

그것을 위해서는 리액터 전류를 가하기 전에 미리 인버터 입력전류를 추정할 필요가 있다. 이의 추정은 3상의 부하전류와 인버터의 스위칭 모드를 알면 가능하고 추정의 원리는 그림 3-2에 표시한다.

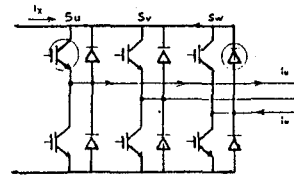


그림 3-2. 인버터의 입력전류 추정원리

Fig.3.2. Estimation principle of inverter input current

인버터 입력전류는 상속 IGBT가 온하고 있는 상의 부하전류의 합이 됨으로 인버터 입력전류의 추정값 i_x^* 는

$$i_x^* = i_u S_u + i_v S_v + i_w S_w \dots \dots \dots (3-2)$$

와 같이 된다. 여기서 S_u, S_v, S_w 은 스위칭 함수이고 상속의 IGBT가 온 할 때를 1로 하속의 소자가 온 할 때를 0으로 한다. 그러나 실제의 공진링크부에는 저항분이 있고 부하에 의한 제동효과가 있기 때문에 공진리액터의 전류 초기값이 인버터의 입력전류와 같은 상태에서는 공진상태가 감쇄하고 콘덴서 전압이 영 크로스가 되지 않게 된다. 이것을 해결하기 위해서는 감쇄분을 보상할 보상전류를 공진링크에 부여 해 주어 최적인 공진 초기전류를 흐르게 하는 것이다. 만약 보상전류가 필요 이상인 경우에는 콘덴서 전압이 오우버 슈트 하므로 최적인 보상전류를 구할 필요가 있다.

4. 최적인 공진 초기전류의 산정 및 시뮬레이션

공진링크의 초기전류값을 구하기 위해서는 공진링크의 각 손실을 고려하여 해석할 필요가 있다. 먼저 공진링크에 있어서의 손실 및 부하에 의한 제동효과를 고려한 3차계 동기회로를 그림 4-1에 나타낸다.

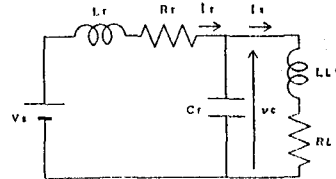


그림 4-1. 3차계 동기회로

Fig4-1. Tertiary system equivalent circuit

공진 DC Link 인버터에는 한 공진주기에서 선형성이 성립하므로 그림 4-1의 회로도에는 중첩의 원리가 적용될 수 있다. 여기에는 공진링크내의 현상으로써 출력 기본파 성분과 공진주파수 성분이 존재하는 것에 착안하여 이것들을 두개의 주파수 성분으로 분리하여 동기회로를 고려해 볼 수 있다. 출력 기본파 및 공진주파수 성분에 따른 동기회로를 각

각 그림4-2(a), (b)에 표시한다.

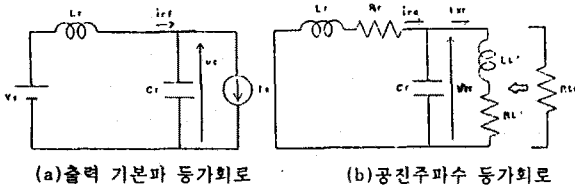


그림 4-2.

Fig. 4-2. (a)Equivalent circuit for output fundamental frequency components (b)Equivalent circuit for resonant frequency components.

여기에서 인버터의 부하를 직류측에서 보았을때 임피던서의 환산으로부터 아래와 같이 R_L' 및 L_L' 의 직렬회로로써 취급할 수 있다.

$$R_L' = \frac{3}{2} R_L, \quad L_L' = \frac{3}{2} L_L \quad (4-1)$$

이 식에서 R_L 및 L_L 은 Y결선시의 삼상부하 한상에 대한 저항 및 인덕턴서를 표시한 것이다.

기본파 주파수성분의 등가회로는 전원과 부하간의 유효전력의 흐름을 표시한 것이다. 이 회로에 있어서 공진 리액터의 전류 i_{rr} 는 한 공진주기내에 일정한 것으로 간주하면 인버터의 부하전류의 기본파 성분에 대응하는 인버터의 직류측 전류 I_x 와 같다. 또한 공진콘덴서 전압에 대해서도 한 공진주기내에 일정한 것으로 간주하여 그 근사적인 평균값을 고려하여 직류전원 전압 V_s 와 등가이다. 이 등가회로는 일반적인 전압형 인버터의 회로이며 기본파 전력의 수수에 관해 양자가 등가인 것을 표시한다.

다음으로 공진주파수 성분 등가회로는 전원을 가지지 않는 구성이 되고 공진리액터와 공진콘덴서의 초기값만에 의해 동작한다. 공진리액터의 전류초기값 I_{rc1} 는 실제의 값에서 기본파 주파수성분 등가회로에 있어서의 값인 인버터의 직류측 전류 I_x 로 뺀 것으로 된다.

$$I_{rc1} = I_{ro} - I_x \quad (4-2)$$

또한 공진콘덴서 전압의 초기값 V_{cr1} 에 대해서도 실제의 값과 출력기본파 성분 등가회로의 값과의 차로 된다.

$$V_{cr1} = V_{co} - V_s = -V_s \quad (4-3)$$

이 등가회로에는 공진회로에 대해서 부하가 미치는 제동효과를 나타내므로 직류측에서 본 인버터를 등가 제동저항 R_{Ld} 로 간주해서 해석상 고려할 수 있다.

이 등가저항 R_{Ld} 의 값은 공진주파수와 같은 주파수으로써 전압이 같은 두개의 정현파 교류 전압원이기에 각각 공진링크 축에서 본 인버터의 등가회로(R_L' , L_L' 의 직렬회로)를 등가저항으로 접속될 경우 같은 유효전력을 소비하도록 결정될 수 있다. 즉,

$$R_{Ld} = R_L' + \frac{(\omega L_L')^2}{R_L'} \quad (4-4)$$

이 된다. 이 식에 있어서 ω 는 공진회로의 공진주파수이며 유도전동기에서 공진주파수를 20[kHz] 정도로 높게하면 임피던서는 누설 인덕턴서에 의해 유도성이 매우 큰 값을 가지므로 제동저항 R_{Ld} 의 값은 크게되며 공진링크에 부여되는 제동효과는 적게 된다. 그리고 공진링크의 제어의 측면에서도 유리하다. 이 때문에 인버터의 출력파형이나 응답속도 개선의 관점에서만 아니라 공진링크의 제어에 따른 관점에서 공진링크의 공진주파수를 가능한 높게 설정하는 것이 바람직하다고 결론을 내릴 수 있다.

기본파 주파수성분 등가회로에서 요구되는 초기값은 이미 전술한 것과 같이 인버터의 직류측 전류 I_x 가 되며 이것은 인버터의 각상의 부하전류값과 스위칭 계수에서 쉽게 계산될 수 있다. 따라서 최적값을 검토하기 위해 남게 되는 것은 공진주파수 성분 등가회로에서 요구되는 초기값 성분만이 있고 이것에 대해서는 그림 4-2(b)의 등가회로에 의해 해석을 행하고 최적값을 구한다.

공진주파수 성분 등가회로의 회로방정식은

$$(R_r I_{rc}) + L_r \frac{dI_{rc}}{dt} + V_{cr} = 0 \quad (4-5)$$

$$C_r \frac{dV_{cr}}{dt} + I_{xr} = I_{rc} \quad (4-6)$$

$$V_{cr} = R_{Ld} I_{xr} \quad (4-7)$$

이 방정식들을 풀어서 $V_{cr}(t)$ 를 구하면

$$V_{cr}(t) = -V_s e^{-\alpha t} \cos \omega t + \sqrt{\frac{C_r}{L_r}} I_{rc1} e^{-\alpha t} \sin \omega t \\ = e^{-\alpha t} \sqrt{V_s^2 + \left(\frac{I_{rc1}}{\omega C_r}\right)^2} \cos(\omega t + \pi - \phi) \quad (4-8)$$

단, $\phi = \tan^{-1}\left(\frac{I_{rc1}}{\omega C_r V_s}\right)$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{L_r C_r}} \quad \alpha = \frac{1}{2} \left\{ \frac{1}{R_{Ld} C_r} + \frac{R_r}{L_r} \right\}$$

콘덴서 전압이 영 크로스 되기 위해서는 한 공진주기후 $t=T$ 에서 공진콘덴서 전압 V_{cr} 는

$$V_{cr}(T) \leq -V_s \quad (4-9)$$

을 만족해야 하므로

$$e^{-\alpha T} \sqrt{V_s^2 + \frac{L_r}{C_r} I_{rc1}^2} \geq V_s \quad (4-10)$$

공진전류 초기값 I_{rc1} 는

$$I_{rc1} \geq \frac{V_s}{Z_r} \sqrt{e^{(2\pi(1/Q_r)(1+\epsilon))} - 1} = I_g \quad (4-11)$$

여기서

$$\epsilon = L_r/R_r R_{Ld} C_r \dots\dots\dots (4-12)$$

또한 공진링크의 특성 임피던서 Z_r 및 양호도 Q_r 는 아래와 같이 주어진다.

$$Z_r = \sqrt{L_r/C_r} \dots\dots\dots (4-13)$$

$$Q_r = \omega_r L_r/R_r \dots\dots\dots (4-14)$$

식 (4-11)에 있어서 우변과 좌변의 값이 같게 될때 전류 초기값은 최소값으로 되며 공진지속 조건을 만족한 공진콘덴서의 침투전압을 최소로 하는 값이기 때문에 I_E 를 최적인 보상전류라고 할 수 있다. 또한 일반적인 경우 부하의 인덕턴서 성분은 매우 크며 공진주파수를 크게 설정하면 등가계동저항 R_{Ld} 는 큰 값으로 되고 식 (4-11)에 ϵ 의 값은 아주 적게 되어 최적인 보상전류는 공진링크의 특성 임피던서 Z_r 과 Q_r 및 전원전압 V_s 에 의해서 결정된다. 그림 4-3, 그림 4-4는 최적인 보상전류 I_E 의 해석결과에 의해 아래 2종류의 파라메타에 대해 설명된다.

$L_r=120[\mu H]$	$L_r=60[\mu H]$
(a) $C_r=0.75[\mu F]$	(b) $C_r=1.5[\mu F]$
$R_r=320[m\Omega]$	$R_r=160[m\Omega]$

그림 4-3은 직류전압 $V_s=150[V]$ 에 의하며, 부하 리액터 L_L 이 크게 되면 일정치에 수렴되는 것을 볼 수 있다.

그리고 그림 4-4는 부하 리액터 $L_L=750[\mu H]$ 에서의 직류전압과 보상전류 관계를 보여준다.

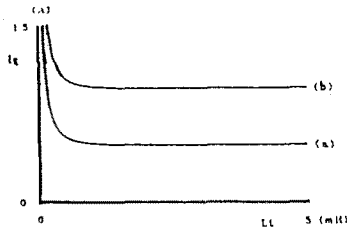


그림 4-3. 부하 리액터와 보상전류 관계

Fig.4-3. Relation between load reactor and compensating current

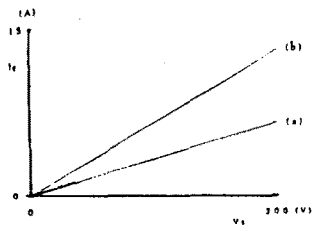


그림 4-4. 직류전압과 보상전류 관계

Fig.4-4. Relation between dc voltage and compensating current

그림 4-3과 그림 4-4에서는 특성 임피던서가 클때 보상전류가 적용을 알 수 있다. 다음으로 공진 DC Link의 특성 임피던서와 0값이 같은 아래 2종류의 파라메타에 대해서도 해

석을 하며, 이때 $V_s=150[V]$ 이다. 그 결과를 그림 4-5에 나타내며 보상전류는 L_L 이 크게되면 일정값으로 수렴됨을 알 수 있다.

$L_r=120[\mu H]$	$L_r=60[\mu H]$
(a) $C_r=1.8[\mu F]$	(b) $C_r=0.9[\mu F]$
$R_r=200[m\Omega]$	$R_r=200[m\Omega]$

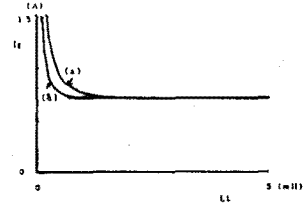


그림 4-5. 부하 리액터와 보상전류 관계

Fig.4-5. Relation between load reactor and compensating current

그림 5-1. 공진 DC Link 인버터 주회로

Fig.5-1. Main circuit of Resonant DC Link inverter

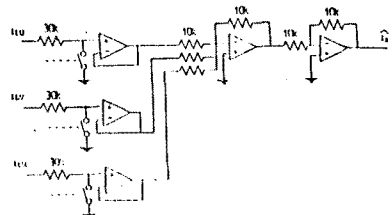


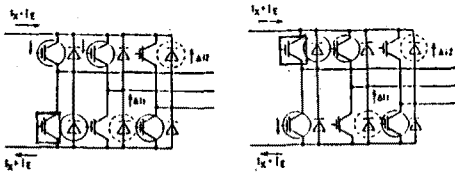
그림 5-2. I_x 추정회로

Fig.5-2. Estimation circuit of I_x

2. 스위칭 소자들의 축적시간을 보정한 스위칭 기법

앞절에서 시스템의 해석과 제어방식에 관해서 설명했으나 실제의 시스템을 동작시킬 경우 IGBT의 축적효과의 영향이 문제가 된다. 콘덴서 단락기간에 있어서 IGBT의 축적효과에

의해 오픈하는 시간이 낮으면 리액터의 전류 초기값이 필요 이상으로 되어 콘덴서 전압은 오버 슈트 하므로 스위칭에 의한 보정이 필요하다. 그 방법으로써, 부하에는 리액터 성분이 있으므로 단락하지 않는 상에 대해서도 상, 하 어느 상을 온 시켜서 전류 루프를 확보해 놓으므로 해서 다음 공진 개시때에 온 될 소자의 축적시간에 대한 영향을 최소화 할 수 있다. 콘덴서 단락에 이용되는 소자의 선택에 있어서 고려해야 할 것은 온 신호가 부여된 소자의 도통방향과 그 상의 부하전류의 방향이 일치하여야 하고 역 방향 다이오드와는 관계가 없어야 하며 부하전류의 분포를 흐트리지 않을 때 콘덴서 단락 동작이 실현될 수 있다고 결론을 내릴 수 있다. 그림 5-3에 특정 상이 단락할 때의 전류흐름을 보인다.



(a) 하측 다이오드가 온 경우 (b) 상측 다이오드가 온 경우
(a) Low-side Diode-ON (b) High-side Diode-ON

그림 5-3. 특정 상이 단락할 때의 전류흐름
Fig.5-3. Current flow of special Phase-Short

여기서는 전류흐름의 일례로써 ○표시는 그 소자에 대한 온 신호가 부여된 것을 표시하며, □표시된 소자를 암 단락에 이용한다. 그림 (a), (b)에 파선으로 표시한 다이오드에는 순 방향 바이어스가 걸리므로 온 되고 Δ₁, Δ₂ 전류는 그림과 같이 흐르며 콘덴서 단락 종료시에 IGBT에 흐르는 전류가 I_E보다 증가한다. 그러나 다이오드가 온하기 위해서는 동상 반대측 IGBT에 전류가 흘러야 되므로 Δ₁, Δ₂의 미소전류는 문제가 되지 않는다.

다음 공진상태에서 IGBT가 온하는 상을 사전에 추정하는 것은 복잡한 제어회로 구성을 필요로 하게 되므로 다음의 공진상태에 관계없이 특정의 상이 암 단락하는 방법이 좋으며 전류 증가분은 I_E, V_s, L_r에 의해 결정되고 파라메타가 결정되면 오픈하는 순간에 IGBT에 흐르는 전류의 크기가 I_E이므로 실험을 하면서 지령값을 보정하면 된다.

3. 실험결과 및 고찰

실험은 직류전압 180[V], 부하전류지령 6[A], 60[Hz], 공진 리액터 100[μH], 공진 콘덴서 0.75[μF], 공진링크 저항분 370[Ω], 부하 리액터 5[mH], 부하 저항분 6.8[Ω]으로 한다. 그림 5-4는 부하전류지령과 부하전류의 정상파형이다.

그림 5-5는 공진전류 파형과 콘덴서 전압파형이며 공진전류는 인버터 입력전류 중심으로 진동하고 콘덴서 전압은 직류전압을 중심으로 진동하고 있다.

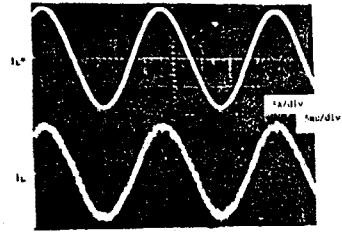


그림 5-4. 부하전류 지령과 부하전류
Fig.5-4. Load command current and Load current

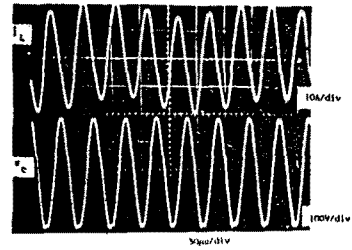


그림 5-5. 공진전류와 콘덴서 전압파형
Fig.5-5. Resonant current and Condenser voltage waveform

최적인 보상전류를 측정하기 위해 직류전압을 150[V], 부하전류 지령을 5[A], 60[Hz], 부하저항을 2[Ω]으로 하고 부하 리액터의 값을 변화시킬 경우에 대해 그림 5-6에 나타내었고 직류전압 100[V], 부하저항 2[Ω], 부하 리액터 5[mH]로 하고 부하전류 지령의 크기를 변화시킬 경우에 대해서 그림 5-7에 나타내었다. DC Link 파라메타는 공진주파수가 같은 아래 2종류로 한다.

$L_r=60[\mu H]$	$L_r=120[\mu H]$
(a) $C_r=1.5[\mu F]$	(b) $C_r=0.75[\mu F]$
$R_r=125[m\Omega]$	$R_r=370[m\Omega]$

공진 DC Link의 저항은 콘덴서 전압을 감쇄시킨 상태에서 산출하며 그림 5-6과 그림 5-7에 측정결과를 나타낸다.

각 점들은 실측치이며 실선은 이론치이다. 이것은 앞에서 설명한 최적인 보상전류 I_E의 값이 부하전류나 인버터의 스위칭 소자의 축적시간에 대해 영향을 받지 않음을 보여주는 것이며 앞절의 타당성을 입증해 준다

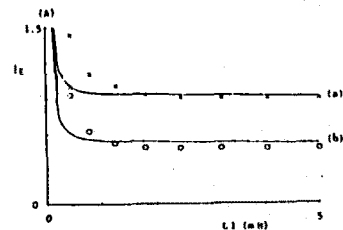


그림 5-6. 부하 리액터변화시킬 경우의 최적인 보상전류의 측정결과

Fig.5-6. Measuring result of optimal compensating current in case of variation Load reactor

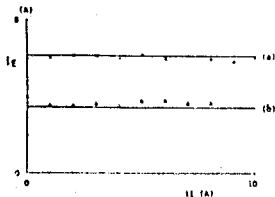


그림 5-7. 부하전류 지령을 변화시킬 경우의 최적인 보상전류의 측정결과

Fig. 5-6. Measuring result of optimal compensating current in case of variation Load command current

그림 5-6을 보면 리액터 값이 적게되면 측정값이 해석결과 값보다 크게 된다. 이것은 부하 리액터의 값이 적게되면 공진주파수가 높게 되어 표피효과의 영향도 있지만 그것보다도 공진 DC Link의 저항분에 크게 영향을 받기 때문이다.

그림 5-7은 식 (4-11)의 해석결과와 같이 보상전류는 부하전류의 변화의 변화에 일정함을 보여준다.

6. 결론

본 논문에서는 공진 DC Link 전압형 인버터를 제안하여 공진 초기전류 보상에 밀접하게 관련된 공진주파수 성분을 해석하여 공진상태를 최적상태로 유지하기 위한 리액터전류 초기값을 산출 하였으며 그 결과식에서 인버터의 입력전류와 공진 DC Link에서 감쇄분의 보상전류는 공진 DC Link의 특성임피던스, Q 및 부하 리액터에 따라 변화됨을 알 수 있었다. 그리고 인버터 스위칭 소자의 축적시간에 의한 영향을 고려한 스위칭 모드에 대해서도 부가적으로 제시 하였다. 실험결과를 통해 이 해석들의 타당함이 입증되었다.

참 고 문 헌

- [1] 李鉉雨, "새로운 素子를 사용한 電源裝置의 技術動向 (I)" 電氣設備, vol. 9, No. 2, pp18-23 (1992)
- [2] D.M Divan, "The Resonant DC Link Converter - A New Concept in Static Power Conversion", Conf. Rec. of IEEE Ind. Appl. Soc. Annu. Meeting, p.648 (1986)
- [3] D.M Divan, G.Venkataramanan & R.W.De Doncker, "Design Methodologies for Soft Switched Inverters", ibid., p.758 (1988)
- [4] 佐藤之彦, 他, "共振 DC 링크인버터의解析と制御法の改善", 電學論D, vol. 111, No. 7, p. 531 (1991)
- [5] Y.Sato, Y.Matsumoto & T.Kataoka, "A Control Method of Resonant DC Link Inverter", Conf. Rec. of IPEC-Tokyo, p.346 (1990)
- [6] F. C. Lee, "High-Frequency Quasi-Resonant Converter Technologies", Proc. IEEE, 76, 377 (1988)