

## PWM인버터의 출력 LC필터에 의한 공진전압 억제 기법

최경진\*, 전태원\*, 이흥희\*, 노의철\*\*, 김흥근\*\*\*  
 울산대학교\*, \*\*부경대학교\*\*, 경북대학교\*\*\*

### Method for Damping Resonant Voltages on the Output LC Filter of PWM Inverter

G.J. Choi\*, T.W. Chun\*, H.H. Lee\*, E.C. Nho\*\*, H.G Kim\*\*\*

Dept. of Electrical Eng., Univ. of Ulsan\*, Dept. of Electrical Eng., Univ. of Pukyong\*\*,  
 Dept. of Electrical Eng., Univ. of KyungPook\*\*\*

#### ABSTRACT

The LC filter has been generally used to filter the output voltage of PWM inverter to the sinusoidal waveform. The resonant voltage on the output voltage of PWM inverter may be generated due to LC filter. This paper proposed the algorithm to damp the resonant voltage using the virtual resistor without decreasing the efficiency by the power loss in the real resistor. The method is applied to the vector controlled induction motor driven by the PWM inverter with the LC filter. The simulation results are carried out to verify the performances of the proposed algorithm.

#### 1. 서 론

PWM인버터의 출력전압에는 높은 주파수로 스위칭하기 때문에 기본파에 높은 고조파들이 많이 포함되어 있으므로, 이 고조파 성분을 감소시켜 PWM인버터의 출력전압을 정현파로 하기 위하여 일반적으로 인버터 출력단에 LC필터를 연결한다. 그런데 스위칭 주파수에 의한 리플 성분은 LC필터에 의하여 거의 제거되나, 이 LC필터의 공진에 의한 공진전압이 발생하는 문제가 있었다. 이 LC필터의 공진전압을 감쇄시키는 가장 쉬운 방법이 LC필터의 인덕터와 직렬로 제동용 저항을 사용하는 것이다. 그런데 이 저항에 의하여 전압강하가 발생되며, 특히 이 저항의 손실로 인하여 시스템의 효율이 상당히 감소되는 심각한 문제를 발생시킬 수 있다.

따라서 실제 제동저항을 사용하지 않고 LC필터의 공진전압을 감쇄시킬 수 있는 여러 제어 기법들이 발표되었다. 먼저 기준 정현파 전압으로 LC필

터 출력전압을 제어시키기 위하여 PWM펄스를 제어하는 방법이 제시되었으나, 이 방식은 단순한 UPS의 출력전압용으로만 사용될 수 있으며 유도전동기 구동장치에는 적용하기 힘들다.<sup>[1]</sup> 그리고 LC필터 출력전압을 제어하기 위하여 교류전동기 벡터제어에서의 고정자 전류를 계산 제어하는 방식이 발표되었으나, 고정자 전류를 계산하는 과정이 너무 복잡하다는 문제가 있다.<sup>[2]</sup> 또한 실제 제동저항을 사용하지 않고 제동저항이 있는 것과 같은 효과를 낼 수 있는 가상저항을 사용하는 제어 알고리즘이 발표되었다.<sup>[3,4]</sup> 기준 정현파 전압으로 LC필터 출력전압을 제어하면서 가상 제동 저항식을 사용하여 인버터 출력전압에 포함되어 있는 LC필터의 공진전압을 상쇄시키는 방식이나, 이 제어 기법은 유도전동기 벡터제어에 적용하기가 힘들다는 문제가 있다.

본 논문에서는 PWM인버터-벡터제어 유도전동기 구동장치에 적합한 새로운 가상저항을 사용한 LC필터 공진전압 억제 기법을 제시한다. 먼저 LC필터에서 제동저항의 설치위치에 따라, 제동저항 값의 변화에 대한 공진전압의 제동효과, 필터링효과와 함께 벡터제어에 적용 가능성 등을 고려하여 가장 적절한 제동저항 설치 위치를 결정한다. 다음은 벡터제어 유도전동기 구동장치에서 가상저항으로 LC필터 공진전압을 억제시키는 기법을 제시한 후, 시뮬레이션 결과를 통하여 본 논문에서 제시한 기법에 대한 타당성을 확인한다.

#### 2. LC필터 특성분석

LC필터에 의한 공진전압을 억제하기 위해 제동저항을 연결하는 방법으로는 제동저항을 인덕터에 직렬 혹은 병렬로 또는 커패시터에 직렬 혹은 병렬

로 연결하는 4가지 방식이 있다. 이 4가지 제동저항의 연결 방식에 대하여 제동저항 값의 변화에 대하여 공진전압의 제동효과, 차단주파수의 변화 등을 각각 관측하고, 백터제어에 적용 가능성을 참조하여 가장 적절한 제동저항 연결방법을 결정한다.

그림 1은 4가지 제동저항 연결방법을 보인 것이다.

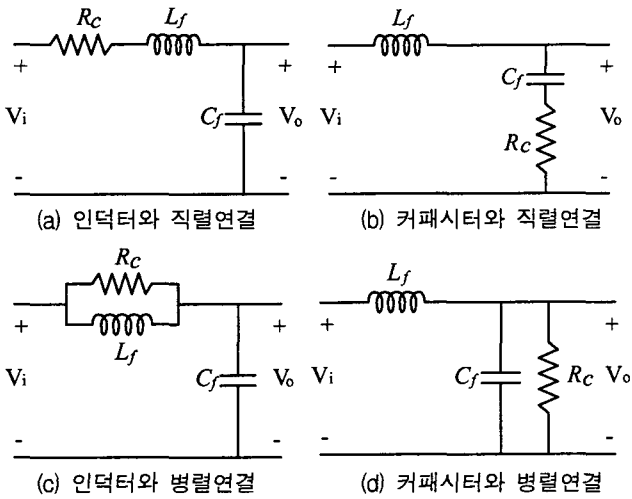


그림 1 4가지 제동저항 연결 방법

Fig. 1 Four possible connections of resistor

위의 4가지 제동저항 연결방법 즉 인덕터와 직렬연결, 커패시터와 직렬연결, 인덕터와 병렬연결, 커패시터와 병렬연결 시 전압이득 식은 각각 (1)-(4)와 같다.

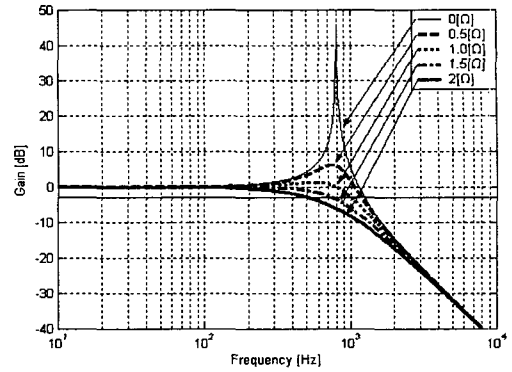
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{L_f C_f} \frac{1}{S^2 + \frac{R_c}{L_f} S + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (1)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{R_c}{L_f} S + \frac{1}{L_f C_f}}{S^2 + \frac{R_c}{L_f} S + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (2)$$

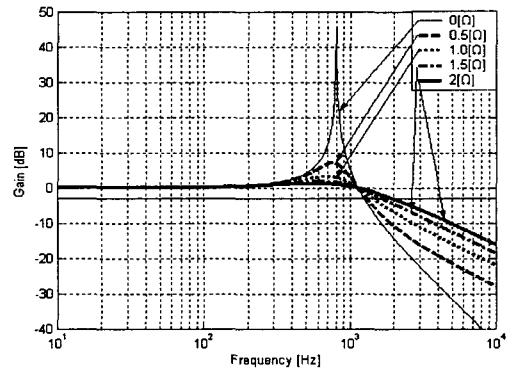
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{1}{R_c C_f} S + \frac{1}{L_f C_f}}{S^2 + \frac{1}{R_c C_f} S + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (3)$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{L_f C_f} \frac{1}{S^2 + \frac{1}{R L_f} S + \frac{1}{L_f C_f}} \quad (4)$$

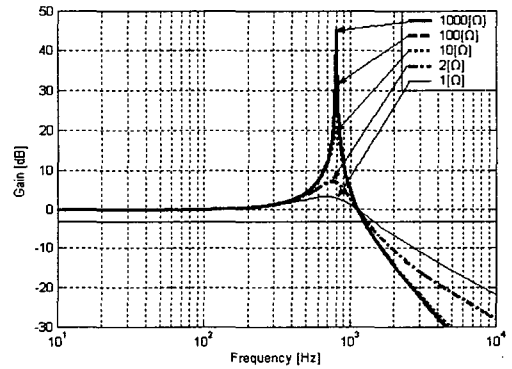
위의 식을 사용하여 각 제동저항 연결방법에 따른 LC필터의 주파수특성을 분석한다.



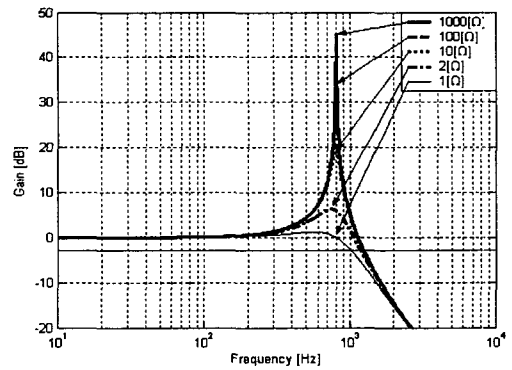
(a) 필터인덕터와 직렬 연결시



(b) 필터커패시터와 직렬 연결시



(c) 필터 인덕터와 병렬 연결시



(d) 필터커패시터와 병렬 연결시

그림 2 제동저항 변화에 대한 주파수 응답특성  
Fig. 2 Frequency response for variations of damping resistor

그림 2는 LC필터의 차단 주파수가 800[Hz]가 되도록 필터 인덕터 및 커패시터  $L_f$ 과  $C_f$ 를 같은 값으로 결정하고 제동저항을 변화 시켰을 경우 LC필터의 주파수 응답 특성을 4가지 제동저항 연결방식에 따라 각각 보인 것이다.

그림 2(a)는 제동저항을 인덕터와 직렬로 (b)는 커패시터와 직렬로 연결한 후 이 저항값을 0에서 2[Ω]로 변화 시 주파수 응답특성을 각각 보인 것이다. 제동저항을 인덕터와 직렬연결 시에는 제동저항이 증가하면서 제동효과가 증가되고 또한 차단 주파수가 감소되어 필터링효과도 향상된다. 그런데 제동저항을 커패시터와 직렬연결 시에는 제동저항이 증가하면서 제동효과는 향상되지만 차단주파수가 증가되어 필터링효과는 떨어진다. 그림 2(c)와 (d)는 제동저항을 인덕터와 또는 커패시터와 병렬로 각각 연결하고, 이 저항값을 1[KΩ]에서 1[Ω]으로 감소 시 주파수 응답특성을 각각 보인 것이다. 제동저항을 인덕터와 병렬 연결 시에는 제동저항이 감소하면서 제동효과는 증진되나 필터링효과는 저하된다. 그런데 제동저항을 커패시터와 병렬 시에는 제동저항을 감소시키면 제동효과는 향상되면서 차단주파수가 감소되어 필터링효과도 좋아진다.

따라서 위의 4가지 방식 중 제동저항의 변화 시 제동 및 필터링 효과가 동시에 우수한 커패시터와 병렬연결 방식을 유도전동기 벡터제어 시스템에 적용한다.

### 3. LC필터 공진전압 억제 기법

LC필터는 PWM인버터의 출력전압을 정현파로 필터링하기 위해 사용되며, LC 필터에 의해 발생하는 공진 전압을 억제하기 위해 LC필터에 제동저항을 사용한다. 그러나 실제 전력장치에서는 이 제동저항에 의한 전압강하 및 저항손실 때문에 이 제동저항을 사용할 수 없다. 따라서 실제 제동저항대신 이 제동저항과 거의 동일한 효과를 낼 수 있는 가상 제동저항을 사용하는 기법을 제시한다.

그림 2에 보여준 제동저항 연결 방식 중 제동효과와 필터링 효과를 동시에 만족하는 방식이 인덕터와 직렬연결 방식과 커패시터와 병렬연결 방식 등 2가지가 있었다. 여기서 인덕터 직렬연결 방식은 제동저항을 가상저항으로 구현 시, 3상 인덕터 전류 측정용 센서가 더 필요하다. 이에 반하여 커패시터 병렬연결 방식은 3상 커패시터 전압 측정용 센서가 더 요구된다. 그런데 전류보다 전압 측정이 구현하기가 더 쉬우며 특히 유도전동기의 직접 토크제어에서는 전동기 입력전류와 함께 입력전압 즉 커패시터 전압까지 검출하여야 하므로 커패시터

전압을 같이 사용할 수 있다는 장점도 있다.

따라서 본 논문에서는 커패시터와 병렬로 연결되는 제동저항을 가상저항으로 구현하는 기법을 제시하며, 그림 3은 그림 1(d)를 다시 그린 것이다.

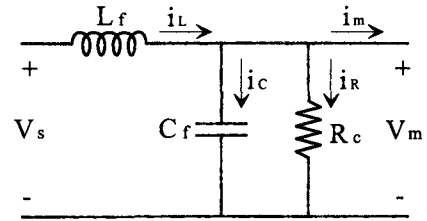


그림 3 커패시터와 병렬 연결된 제동저항 회로  
Fig. 3 Circuit for damping resistor in parallel with filter capacitor

그림 3을 사용하여 다음 식들을 유도할 수 있다.

$$i_L = \frac{1}{SL_f}(V_s - V_m) \quad (5)$$

$$i_c = i_L - i_R - i_m \quad (6)$$

$$i_c = SC_f V_m \quad (7)$$

식 (5), (6), (7)을 이용하여 제동저항이 병렬로 연결된 LC필터를 블록도로 나타내면 그림 4와 같다.

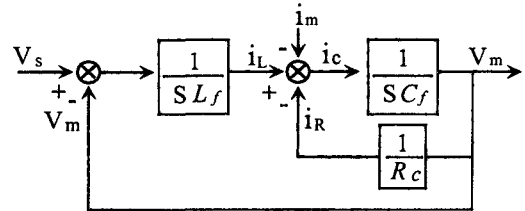


그림 4 제동저항이 있는 LC필터 블록도  
Fig. 4 Block diagram of LC filter with damping resistor

그림 4에서 제동용 가상저항으로 구현하기 위한 블록도는 그림 5와 같다.

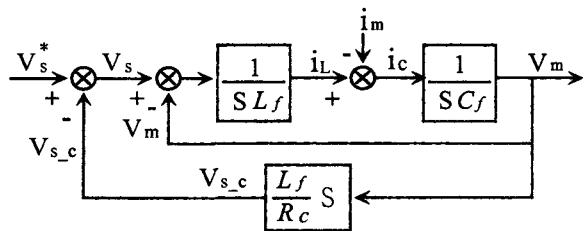


그림 5 LC필터의 제동용 가상저항 블록도  
Fig. 5 Block diagram of virtual resistor in the LC filter

그림 5에서 커패시터 전압을 미분하여 ( $L_f/R_c$ )를 곱한 값이 LC필터 공진전압을 감소시키기 위한 가상 저항성분이 된다. 기준전압에서 이 성분을 뺀 값이 LC필터 입력전압 즉 PWM입력전압이 된다.

#### 4. 가상저항을 사용한 유도전동기 벡터제어

가상저항을 사용하여 LC필터의 공진전압을 억제시키는 기법을 유도전동기 벡터제어 시스템에 적용한다. 다음 식은 3상 커패시터 전압을 2축 동기각 속도 회전축으로 변환시킨 식이다.

$$V_{ds,c} = \frac{L_f}{R_c} S V_{ds,f} \quad (8)$$

$$V_{qs,c} = \frac{L_f}{R_c} S V_{qs,f} \quad (9)$$

여기서  $V_{ds,c}$ ,  $V_{qs,c}$ 는 각각 d축 및 q축의 가상저항이며,  $V_{ds,f}$ ,  $V_{qs,f}$ 는 각각 d축 및 q축의 커패시터 전압 즉 전동기 입력전압이다.

그림 6은 식(8)과 (9) 및 그림 5를 참고하여 벡터제어 시 가상 제동저항의 블록도이다. 벡터제어 루프를 수행 후 출력되는 d축 및 q축 기준전압에 d-축 및 q-축 가상저항 항을 뺀 후, PWM 인버터의 기준전압이 된다.

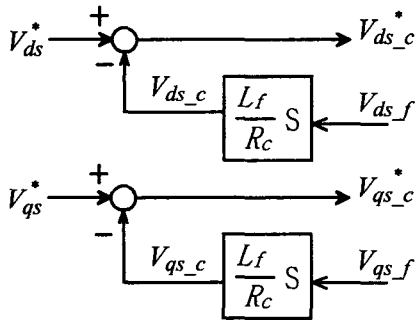


그림 6 벡터제어 시 가상저항 블록도

Fig. 6 Block diagram of virtual resistor at vector control

그림 7은 가상저항을 사용한 유도전동기 벡터제어 시스템의 제어루프를 보인 것이다. LC필터의 출력전압 즉 유도전동기 3상 선간 전압을 측정하고, 이 전압을 2축 고정좌표계 전압으로 변환시킨 후 다시 2축 동기좌표계 전압  $V_{ds,f}$ ,  $V_{qs,f}$ 으로 변환시킨다. 이 전압들을 식(8)과 (9)를 사용하여 d-축 및 q-축 가상저항으로 증가된 전압  $V_{ds,c}$ ,  $V_{qs,c}$ 을 각각 계산한다. 한편 속도제어 루프 및 자속제어 루프를 수행한 후 출력된 d와 q축 기준전압에서 가상저항을 증가한 전압값을 각각 뺀 후, 이 전

압값으로 PWM인버터의 PWM 펄스를 발생시킨다.

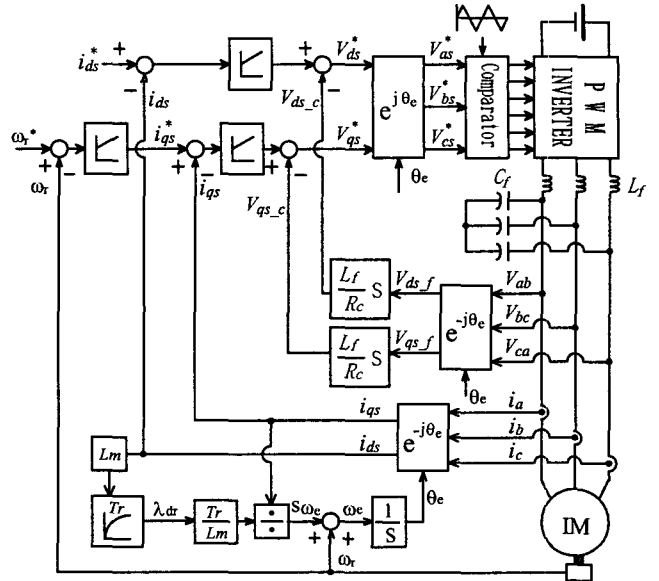


그림 7 가상저항 사용시 유도 전동기 벡터제어 시스템  
Fig. 7 Vector controlled induction motor system using virtual resistor

#### 5. 시뮬레이션 및 고찰

시뮬레이션에서는 2.2[KW] 용량의 유도전동기를 사용하였으며, LC필터의  $L_f = 2.5[mH]$ ,  $C_f = 2.5[mF]$  일 경우 가상저항에 대한 효과를 분석하기 위하여 전력전자 시뮬레이션용 소프트웨어인 PSIM을 사용하여 시뮬레이션을 수행하였다. PWM인버터의 스위칭 주파수가 3[KHz], 샘플링시간이 150[μs]이며 전동기속도가 500[rpm], 부하토크가 5[N.m]의 정상상태에서 가상저항기법을 적용하지 않았을 경우와 가상저항기법을 사용하였을 경우에 대한 시뮬레이션 결과를 각각 보인다.

그림 8은 가상저항기법을 적용하지 않았을 경우, a상과 b상 사이의 전동기 입력 선간전압  $V_{ab,f}$ , d-축 및 q-축 전동기 입력전압  $V_{ds,f}$ ,  $V_{qs,f}$ 와 제동용 d축 및 q축 가상저항 성분  $V_{ds,c}$ ,  $V_{qs,c}$ 의 정상상태 파형을 보인 것이다. 전동기 입력전압의 파형을 보면 PWM인버터의 스위칭에 의한 고조파성분은 거의 제거되었지만 LC필터에 의하여 약 640[Hz] 공진주파수로 진동하는 비교적 큰 공진전압이 있다. 그리고 d-축 및 q-축 전동기전압은 직류성분에 LC 필터에 의한 공진전압이 포함되어 있다. 그리고 d축 및 q축 가상저항 성분의 전압은 d, q축 전동기전압을 미분하므로 직류성분은 제거되고 공진전압만 남아있으며, 이 공진전압의 크기는 제동저항  $R_c$ 값에 따라 변화된다.

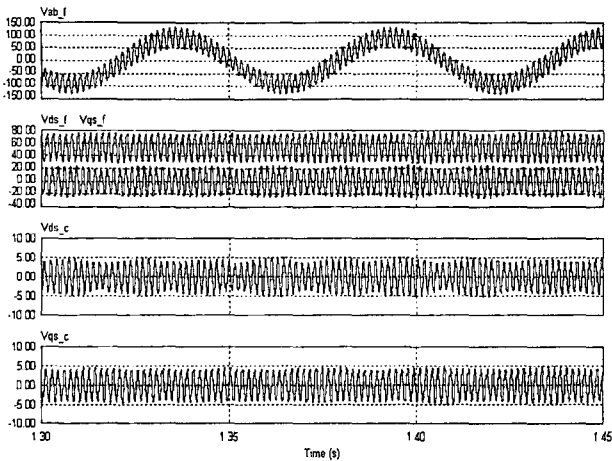


그림 8 가상저항을 사용하지 않을 경우 정상상태 특성  
Fig. 8 Steady-state response without virtual resistor

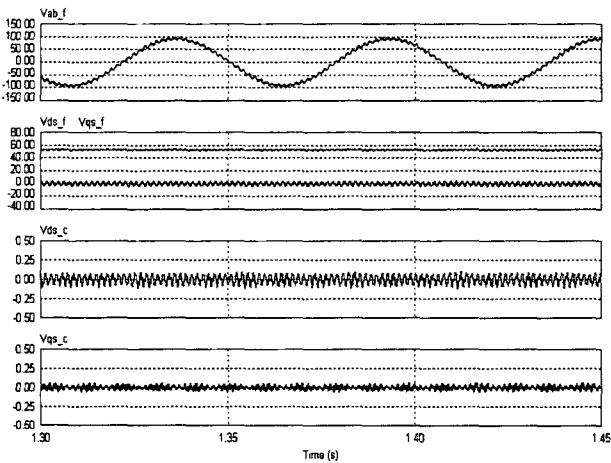


그림 9 가상저항을 사용 시 정상상태 특성 ( $R_c = 50 \Omega$ )  
Fig. 9 Steady-state response at  $R_c = 50 \Omega$

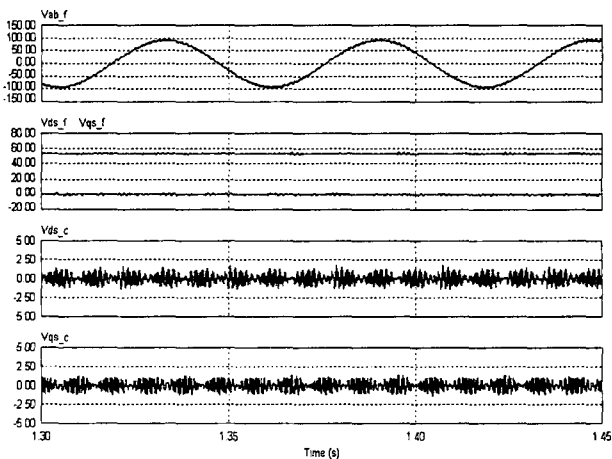


그림 10 가상저항을 사용 시 정상상태 특성 ( $R_c = 2 \Omega$ )  
Fig. 10 Steady-state response  $R_c = 2 \Omega$

그림 9와 그림 10은 가상저항 값이 각각  $50\Omega$ ,  $2\Omega$ 일 경우 시뮬레이션 결과를 보인 것이다. 가상저항에 의하여 전동기 입력전압에 포함된 공진전압

이 대부분 상쇄되어 입력전압의 파형이 거의 정현파이지만, 가상저항 값에 따라 파형이 약간 달라진다. 가상저항  $50\Omega$ 일 경우와  $2\Omega$ 일 경우를 비교하면 가상저항 값이 클수록 제동용 d축 및 q축 가상저항 성분  $V_{ds_c}$ ,  $V_{qs_c}$  값이 작아지므로 제동효과가 떨어진다. 따라서 전동기 입력전압에 공진전압에 의한 리플성분이 더 증가하게 됨을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 가상 저항을 사용하여 효율의 감소 없이 실제 제동저항과 거의 동일하게 PWM인버터 출력 LC필터에 의한 공진전압을 억제시키는 기법을 제시하였다. 제동저항을 LC필터의 커패시터와 병렬로 연결 방식이 공진전압의 제동 및 필터링 효과와 함께 별도의 센서 등을 고려한 결과 교류전동기 벡터제어시스템에 가장 적합함을 확인하였으며, 유도전동기 벡터제어 시스템에서 가상저항으로 공진전압을 효율적으로 억제를 위한 알고리즘을 개발하였다.

시뮬레이션을 수행한 결과 가상저항 알고리즘 적용 시 LC필터에 의한 공진전압이 거의 대부분이 제거되었으며, 특히 제동저항이 작을 경우에는 제동효과가 더 증가되었다. 향후 TMS320LF2406을 사용하여 실제 실험을 수행할 예정이다.

본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소 주관으로 수행된 과제(02-중-02)임

## 참고 문헌

- [1] Koczara W., Seliga R., and Matrzek J., "Sine-Wave Voltage Inverter for Variable Speed Cage Induction Motor Drive System", EPE'99, 1999, pp.1-6."
- [2] H.Rapp and J.Haag, "Stator Current Control for High-Speed Induction Machines operated from inverters with LC-Output-Filter", ETEP, Vol.7, No.4, July/Aug., 1997, pp.235-242
- [3] P.A. Dahono, Y.R. Bahar, Y.Sato, and T. Kataoka, "Damping of Transient Oscillations on the Output LC Filter of PWM Inverters by Using a Virtual Resistor", Proceedings on the PEDS, Vol.1, 2001, pp.403-407.
- [4] P.A. Dahono, "A Method to Damp Oscillations on the Input LC Filter of current-Type AC-DC PWM Converter by using a Virtual Resistor", "Conf. Rec. of INTELEC'03, 2003, pp.757-761.