

특집

## 3상 전력변환장치의 전류제어 기술동향

이진우  
(삼성종합기술원)

### 1. 서론

교류 가변속 전동기구동장치, 교류전원공급장치, 능동형 고조파 보상장치 등의 다양한 3상 전력변환장치에 있어서 전류제어기술은 핵심기술로서 오랜 기간동안 많은 연구문헌의 주요한 주제였으며, 향후에도 계속하여 연구되고 발전 될 것으로 전망된다. 특히 각종 전력변환장치로서 널리 사용되고 있는 전류제어형 전압원 인버터와 근래 산업체에서 전원계통과 연계하여 사용하고 있는 전류제어형 전압원 컨버터에 있어서 전류제어는 장치의 성능과 특징을 결정하는 매우 중요한 부분이다. 그림 1은 전류제어형 전압원 인버터의 전류제어 블록 다이어그램으로서 전류센서를 포함하는 전류측정부와 전류제어부로 구성된 전류제어계의 전체적인 구성을 나타내며, 전류제어부에는 선형제어기 등에서 필요한 전압추정을 포함하는 전압변조부가 내재되어 있다.

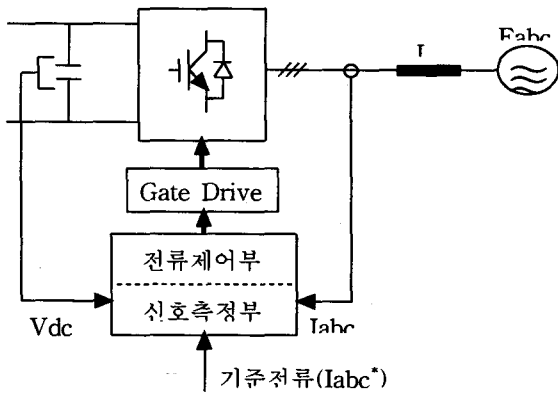


그림 1. 전류제어형 전압원 인버터

전류제어계는 각각의 응용분야에 따라서 요구되는 과도상태 및 정상상태에서의 특성과 수반되는 가격을 고려한 적절한 적용이 요구되며, 일반적으로 전류제어계에 요구되는 사항은 다음과 같다.

- 과도상태에서의 빠른 전류제어응답
- 정상상태오차가 없을 것
- 각종 상수 및 측정의 불확실성, 제한된 제어전압, 시간지연 등에 대한 강인성
- 전력용 반도체소자의 효율적인 전류정격 이용을 위한 오버슈트없는 제어특성
- 3상전류상호간의 비간섭제어
- 직류링크전압의 효율적인 이용
- 전류리플 및 소음 저감
- 효율적인 방열설계를 위한 일정 또는 제한된 스위칭주파수
- 기본파전류의 정밀한 측정을 위한 적절한 샘플링 방법
- 저가격
- 간단하고 신뢰성 있는 구조

### 2. 전류제어부

전류제어부는 기준전류 및 측정전류로부터 제어전압을 발생하여 기준전류를 추종하도록 하는 부분으로서 가장 활발히 연구되고 있으며, 제어기의 형태는 크게 히스테리시스 제어기, 선형제어기, 예측제어기, 퍼지/신경망제어기로 분류 할 수 있다.

## 2.1 히스테리시스 제어기

히스테리시스 제어기는 구조가 매우 간단하여 구현이 쉽고, 제어응답이 빠른 특징을 갖고 있으나, 스위칭 주파수가 부하 및 히스테리시스 폭에 따라서 변하며 특히 역기전력이 작은 경우에는 리미트 싸이클(Limit Cycle)이 발생하여 스위칭주파수가 매우 높아지는 단점이 있다. 따라서 이러한 단점을 적절히 완화 또는 보완하여 실용적으로 적용하기 위한 많은 연구결과가 발표되었으며, 주요 연구내용은 다음과 같다.

스위칭주파수를 제한 또는 제어하기 위하여 히스테리시스 폭을 제어하는 방법, 특히 리미트싸이클을 완화하기 위하여 기준전류에 오프셋전류를 주입하는 방법과 히스테리시스 폭을 조정하는 방법, 전류오차를 히스테리시스 폭으로 제한하기 위한 전류오차벡터개념을 적용한 방법, 과도상태에서의 빠른 제어응답과 정상상태에서의 전류리플을 최소화하기 위한 제어방법, 전류리플의 상대적인 영향을 고려하여 동기좌표계에서 히스테리시스 폭을 차별화하는 방법, 등 [1-3]

이와 같은 히스테리시스 제어기는 저가형 소용량 전력변환기 등에 적절할 것으로 예측된다.

## 2.2 선형제어기

선형제어기는 히스테리시스 제어기와 달리 전류제어기와 제어전압을 구현하기 위한 전압변조부로 구성되어 있다. 여기서는 전류제어기 부분을 살펴보고 전압변조부는 3장에서 다루기로 한다.

전류제어기로는 전류오차 또는 산업체의 다양한 분야에서 사용되고 있는 비례적분제어기(PI 제어기)의 출력을 변조신호로 사용하는 삼각파 비교제어기, PI 제어기를 사용한 정지좌표계 제어기와 동기좌표계 제어기, 단일변수 상태궤환제어기, 다변수 상태궤환제어기, 제어전압인 인버터/컨버터 발생전압의 제한을 고려하여 PI제어기에 Anti-Windup을 적용한 연구와 조건부적분기를 사용한 연구, D-Q 상호간섭을 이용한 동기좌표계 속응 PI제어기, 제어기 연산시간 등의 시간지연을 보상하기 위하여 스미스 예측기(Smith-predictor)를 적용한 연구와 시간지연의 크기를 고려하여 적분기(스위칭주파수 주기마다 리셋(Reset)되는 적분기)의 이득을 선정하는 연구 등의 성능을 향상시키는 연구결과가 발표되었다. [1], [4-7]

공간벡터변조법을 이용한 동기좌표계 PI제어기는 정상상태오차를 동작주파수에 관계없이 제거할 수

있는 특성을 갖고 있으며, 공간벡터전압변조법의 사용으로 전류고조파 특성 및 직류링크 전압이용률이 매우 우수한 제어기이다. 선형제어기의 발전은 이를 근거로 인버터의 최대전압제한, 제어시간지연, 외란 및 간섭 등을 고려한 제어기 연구로 제어기의 이론적인 연구가 성숙되었다.

## 2.3 예측제어기

제어대상 모델을 이용하여 전류응답을 예측하여 제어하는 방법이며, 스위칭주파수를 최소화하는 제어기, 데드비트 제어기, 인버터의 전압제한조건을 이용한 최단시간 제어기 등이 연구되었다. 이와 같은 예측제어기는 모델의 정확성이 떨어질 경우 제어성능이 저하하는 단점이 있으며, 이러한 단점을 보완하기 위하여 적분기를 병행하여 정상상태오차를 제거하기 위한 연구결과가 발표되었다. [1], [9-10]

## 2.4 퍼지/신경망 제어기

정밀한 모델이 필요한 예측제어기와 달리 퍼지/신경망 제어기는 모델이 불확실한 경우에도 전문가의 경험을 배경으로 하는 퍼지제어기와 학습기능을 이용하는 신경망제어기의 특성을 활용하는 제어기이다. 선형제어기 부분을 대체한 퍼지제어기로서 전류오차와 전류오차신호의 미분치를 입력으로 한 시뮬레이션 연구결과가 발표되었으며, 신경망제어기는 비선형함수를 이용한 학습기능을 이용하는 것으로서 공진형 인버터의 최적전류제어기를 학습하여 대체하는 연구, 데드비트제어기에서 파변조알고리즘을 신경망으로 구현한 연구, 온라인으로 전류예측 및 제어를 행하는 연구 등이 발표되었다. [1], [11-12]

모델의 정밀성을 요구하지 않는다는 장점이 있지만 앞으로 보다 많은 연구를 통하여 장점을 유지하면서 상대적으로 다른제어기와 차별화하는 연구가 필요할 것으로 전망된다.

## 3. 전압변조부

전압변조부는 선형제어기 등에서 제어전압을 구현하기 위하여 필요한 부분으로 정밀한 제어전압의 구현 및 제한된 직류링크 전압의 효율적인 이용이 요구된다.

전압변조법으로는 정현파 변조법, 3고조파를 중첩한 정현파 변조법, 공간벡터 변조법 등이 사용되

고 있으며, 하드웨어 및 소프트웨어를 이용하여 구현방법의 효율화를 도모하고 있다. 최근에는 직류링크 전압이용률 및 고조파특성이 우수한 공간벡터 변조법이 널리 확산되고 있으며, 과변조방법도 기준 전압벡터의 크기만을 축소하는 과변조법(스칼라과변조법), 보상전압벡터는 유지하며 전류제한 제어전압벡터의 크기만 축소하는 과변조법(벡터과변조법), 기준전압벡터와 변조된 전압벡터의 차이를 최소화하는 변조법 등이 있으며, 과도상태에서의 전류제어 특성은 벡터과변조법이 가장 우수하다.

한편 전력용 반도체소자의 특성과 전압원 인버터/컨버터의 회로구성 및 동작에 따른 테드타입의 영향과 보상, 영전압 클램핑현상과 보상, 소자의 전압강하 특성과 보상 등 인버터의 여러 가지 비선형특성을 보상하여 보다 이상적인 제어전압의 구현을 위한 노력이 계속되고 있다. [13-15]

#### 4. 전류측정부

전류제어에 있어서 실제전류의 정밀한 측정은 전류제어의 성능을 결정하는 중요한 요소이며, 이를 위한 전류측정부는 전류센서와 전류제어방법에 따른 적절한 신호처리회로로 구성되어 있다.

실제의 전류측정부에서는 오프셋, 각 상별 전류이득의 차이, 온도 및 시간에 따른 특성변화 등이 발생하며, 또한 인버터에서는 스위칭으로 인해 발생하는 리플전류가 항상 존재한다. 따라서 정밀한 전류측정 및 제어를 위해서는 이와 같은 전류측정부와 인버터의 특성을 고려한 이상적인 전류측정방법과 오차를 보상할 수 있는 방법이 요구된다.

리플전류의 영향을 받지 않고 기본과 전류를 정밀하게 측정하기 위하여 전압변조법을 고려하여 전류측정시점을 조정하는법과 전류를 스위칭주기로 적분하여 측정하는 방법, 센서와 신호처리회로의 오프셋을 보상하기 위하여 초기오프셋을 구하여 보상하는 방법 및 운전모드를 고려하여 전류가 영인 동작영역에서 오프셋을 보정하는 방법, 전류이득의 차이를 보상하는 방법 등이 연구 및 적용되고 있다. 한편 하드웨어의 설계에 있어서도 이러한 특성을 고려한 전류센서, 신호처리회로 및 기타 관련부분의 적절한 설계가 요구된다. [16-18]

#### 5. 결론

3상 전류제어기술로서 전류제어부, 전압변조부, 전류측정부를 간단히 고찰하였으며, 이를 통하여 전류제어성능을 향상시키기 위해서는 각 부분의 성능

개선 뿐만 아니라 상호작용을 고려한 연구가 필요함을 알 수 있다.

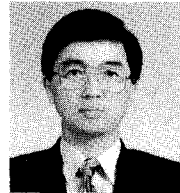
한편 현실적으로 제품에 적용되기 위해서는 기본적으로 요구되는 성능/가격 비의 관점에서 전류제어계의 종합적인 비교와 적절한 선정 및 설계가 요구되며, 이러한 특성을 고려한 연구가 폭넓게 진행될 때 전류제어기술이 보다 성숙될 것으로 기대된다.

여러 가지 제약상 상세히 다루지 못한 부분에 대한 너그러운 양해를 구하며 참고문헌을 보아주시기를 바란다.

#### 참 고 문 헌

- [1] Marian P. Kazmierkowski and Maciej A. Dzieaniakowski, "Review of Current Regulation Techniques For Three-Phase PWM Inverters", Proceedings of the IEEE IECON, pp. 567-575, 1994.
- [2] A. Nabae, S. Ogasawara, and H. Akagi, "A Novel Current Control Scheme for Current-Controlled PWM Inverters", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-22, no. 4, pp. 697-701, 1986.
- [3] Samir Salama and Sarah Lennon, "Overshoot and Limit Cycle Free Current Control Method For PWM Inverters", Proceedings of the EPE conference, vo. 3, pp. 247-251, 1991.
- [4] T. M. Rowan and R. J. Kerkman, "A New Synchronous Current Regulator and an Analysis of Current-Regulated PWM Inverters", IEEE Trans. On Ind. Appl., vol. IA-22, no. 4, pp. 678-690, 1986.
- [5] D. C. Lee, S. K. Sul, and M. H. Park, "High Performance Current Regulator for a Field-Oriented Controlled Induction Motor Drives", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 538-544, 1992.
- [6] J. W. Choi and S. K. Sul, "Fast Current Controller in 3-Phase AC/DC Boost Converter Using d-q Axis Cross-Coupling", IEEE PESC Conf. Rec., pp. 177-182, 1996.
- [7] J. W. Lee, "Digital Current Controller with Smith-Predictor for PWM Converters", The Journal of the Korean Institute of Power Electronics, vol. 1, no. 1, pp. 7-11, 1996.
- [8] H. Le-Huy, K. Slimani, and P. Viarouge, "Analysis and implementation of a real-time

- predictive current controller for permanent-magnet synchronous servo drives", IEEE Trans. On Industrial Electronics, vol. 41, no. 1, pp. 110-117, 1994.
- [9] J. W. Choi, H. W. Kim, and S. K. Sul, "New Current Control Concept - Minimum Time Current Control in Induction Machine Drive", Proceedings of the IEEE IECON, pp.311-316, 1995.
- [10] S. Bhattacharya, D. G. Holmes, and D. M. Divan, "Optimizing Three Phase Current Regulators For Low Inductance Loads", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 2357-2364, 1995.
- [11] B. Burton, R. G. Harley, G. Diana, and J.L. Rodgeron, "Implementation of a neural network to adaptively identify and control VSI fed induction motor stator currents", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 1733-1740, 1994.
- [12] D. R. Seidl, D. A. Kaiser, and R. D. Lorenz, "One-step optimal space vector PWM current regulation using a neural network", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 867-874, 1994.
- [13] J. K. Seok and S. K. Sul, "A New Over-modulation Strategy for Induction Motor Drive Using Space Vector PWM", The Trans. of The Korean Institute of Electrical Engineers, vol. 44, no. 6, pp. 762-766, 1995.
- [14] J. W. Choi and S. K. Sul, "Inverter Output Voltage Synthesis Using Novel Dead Time Compensation", IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 11, no. 2, pp. 221-227, 1996.
- [15] J. S. Kim, J. W. Choi, and S. K. Sul, "Analysis and Compensation of Voltage Distortion by Zero Current Clamping in Voltage-Fed PWM Inverter", IPEC'95 Conference, pp. 265-270, 1995.
- [16] T. Matsui, T. Okuyama, J. Takahashi, T. Sukegawa, and K. Kamiyama, "A high accuracy current component detection method for fully digital vector-controlled PWM VSI-fed AC drives", IEEE Trans. On Power Electronics, vol. 5, no. 1, pp. 62-68, 1990.
- [17] S. H. Song, J. W. Choi, and S. K. Sul, "Current Measurement of Digital Field Oriented Control", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 334-338, 1996.
- [18] D. W. Chung, S. K. Sul, and D. C. Lee, "Analysis and Compensation of Current Measurement Error in Vector Controlled AC Motor Drives", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 388-393, 1996.



**이진우 (李鎮雨)**

1963년 1월 26일생. 1985년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업

(박사). 1991년-현재 삼성종합기술원 선임연구원