

論文98-35S-3-21

6펄스 사이크로컨버터의 새로운 전류제어법

(A New Current Control Method for the Six-Pulse Cycloconverter)

崔正秀*, 曹圭珉**, 金榮石*

(Jung-soo Choi, Kyu-min Cho, and Young-seok Kim)

요 약

본 논문은 대용량 교류전동기의 가변속 구동 시스템으로 이용되는 6펄스 사이크로컨버터의 새로운 전류제어 방법에 관한 것이다. 벡터제어와 같은 고성능 제어에 있어서는 전력 변환기의 출력 전류제어는 과도상태에서 좋은 특성을 가져야 한다. 제안하는 전류제어 방법은 어떠한 상황에서도 사이크로컨버터의 출력전류가 전류 지령을 직접적으로 가능한 한 빠르게 추종하는 것이다. 제안한 새로운 전류제어방법에 대한 모의실험 결과를 나타내었고 이로써 제안한 방법의 타당성을 확인하였다.

Abstract

This paper presents a new current control method of the six-pulse cycloconverter which is used as a variable speed drive system of a large capacity ac motor. For a high performance control as a vector control, it is necessary that the output current control of the power converter has a good characteristic in transient state. A new proposed current control method is that the output current of the cycloconverter is followed after the current reference directly as fast as possible under any condition. Simulation results for the proposed new current control method are shown and its validity of the proposed method is confirmed.

I. 서 론

현재 대형전동기는 상하수도 설비등의 양수플랜트나 제지플랜트의 수천~수백Kw급에서부터 철강플랜트의 수천~수만 Kw급에 이르기까지 그 소요가 점차로 확대되어감과 더불어 고품질, 생산성향상 및 전기에너지 절약의 측면에서 이들 대형전동기들의 가변속구동에 더불어 증가하고 있다. 정속구동에는 무정류자 교류전

동기(주로 농형유도전동기)가 그리고 가변속구동에는 직류전동기가 많이 사용되어 왔으나 전동기 제어기술 및 전력변환기의 발달에 힘입어 대형플랜트의 가변속 구동에 있어서도 교류전동기의 채용이 증가하고 있으며, 이에 필요한 전력변환기로는 변환효율과 대용량화의 용이함등의 측면에서 자연전류형 사이크로컨버터가 적합하다. 자연전류형 사이크로컨버터는 전원전압에 의하여 전류(轉流)를 행하므로 시스템의 신뢰성이 높고, 스위칭 소자로서 다이리스터를 사용하므로 고압, 대용량화가 용이할 뿐만아니라 정현파 출력이 가능하므로 전동기의 저속운전시에도 토오크 리플이 거의 없는 좋은 토오크 특성을 얻을 수 있다. 이러한 점에서 양호한 저속특성 및 대용량이 요구되는 철강 압연기, 광산 권상기, 시멘트 튜브밀 등의 기어리스 구동 등에 자연전

* 正會員, 仁荷大學校 電氣工學科

(Dept. of Electrical Eng., Inha University)

** 正會員, 柳韓專門大學 情報通信科

(Dept. of Information & Telecommunications, Yuhan Junior College)

接受日字:1997年12月16日, 수정완료일:1998年3月6日

류형 사이크로콘버터에 의한 교류전동기의 가변속구동 시스템이 미국, 유럽, 일본 등의 선진 기술국에서는 실용화 되고 있다. 뿐만 아니라 자기부상열차 구동용 선형전동기의 제어 등에도 활용이 되고 있다.^[1 - 4]

교류전동기의 가변속제어 기술로는 현재 급가감속 특성이 우수한 벡터제어법이 많이 적용되고 있는데 이러한 고성능 제어기술은 전력변환기의 출력전류제어에 있어 빠르고 정확한 전류추종능력을 요구한다. 따라서 사이크로콘버터의 출력전류제어에 관한 연구가 필수적으로 요구되어지고 있다.

TADAKUMA씨 등은 동기전동기를 포함한 자연전류형 사이크로콘버터 시스템의 전류제어계를 해석, 시스템 전달함수가 1이 되도록 보상기를 설계하여 디지털 시뮬레이션 및 실험 결과로써 전류응답특성을 고찰한 바 있으나 전동기의 역기전력을 고려함에 있어 역기전력의 극성과 동기되는 위치검출기의 정보로부터 정현파를 발생시키고, 전동기 역기전력의 크기가 회전수에 비례한다고 보고 속도정보와의 곱에 의하여 역기전력을 구하였는데 이경우는 역기전역에 포함된 고조파 분을 고려할 수 없으며 위상동기 가변주파수 함수 발생기 및 고정도, 고속응답의 속도 검출기가 필요하게 되는 등의 구현상의 복잡함이 단점으로 지적된다.^[5]

TAKAHASHI씨 등은 플라이휠-동기기 구성의 에너지축적 시스템의 전력왜형 보상을 위하여 자연전류형 사이크로콘버터의 출력전류제어에 DEAD-BEAT 제어법과 예측제어기법을 적용한 바 있으나 이 경우에도 예측제어기가 출력전류의 상관함수로 부터 반복되는 파형에 대한 학습능력을 갖추게 하기 위하여 디지털 필터기술 등의 현대제어 기술이 적용됨에 따라 두대의 고성능 마이크로프로세인 DSP가 소요되는 등 제어회로의 구성이 용이하지 못한 단점이 있다.^[6]

본 연구에서는 자연전류형 사이크로콘버터의 기본이 되는 6펄스 사이크로콘버터의 새로운 전류제어법을 제안한다. 제안하는 새로운 전류제어법의 기본 원리는 펄스들이 기 제안한 바 있는 LC공진회로를 이용한 사이크로콘버터의 새로운 전류제어법의 원리와 같은 것으로 실험을 통하여 우수한 전류제어성능을 갖고 있음을 확인한 바 있다.^[7,8] 이는 어떠한 상황에서도 실제 전류가 최대한 빠르게 지령전류를 추종하도록 사이크로콘버터의 전류제어를 위한 새로운 점호방식으로 별도의 전류제어용 보상기가 필요하지 않기 때문에 출력주파수 등의 시스템 정수변동에 무관할 뿐 아니라 전

동기 전류제어시 필수적인 역기전력의 검출 등이 요구되지 않으므로 회로구성이 용이하고 회로동작의 거리가 논리판단이므로 동작의 신뢰성 또한 우수하다.

본 논문에서는 6펄스 사이크로콘버터의 새로운 전류제어법의 구현 알고리즘을 소개하고 RL부하에 대한 컴퓨터 모의실험 결과에 대하여 검토를 행하고자 하였다.

II. 본 론

1. 6펄스 사이크로콘버터

그림 1에 6펄스 사이크로콘버터 주회로를 나타내었다. 비순환 전류형 사이크로콘버터로 교류전동기 구동을 위하여 3상 4선 출력을 취하였고 선간단락 방지를 위하여 입력측에 3상 4권선 변압기가 설치된 회로구성이다. 3상 RL부하를 표시하였으나 실제 전동기 운전에 있어서는 전동기 각 상권선을 분리하여 델타결선을 취할 경우에는 입력측의 변압기는 생략이 가능하다.

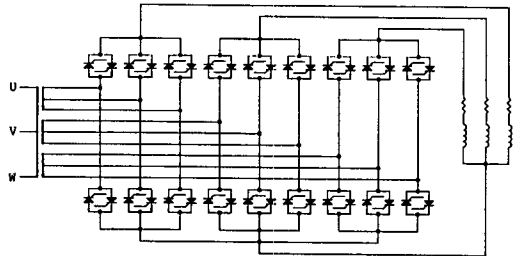


그림 1. 주회로도

Fig. 1. Main circuit configuration.

이는 20~30Hz 이하 출력시 양호한 정현파 전류를 출력할 수 있으며 직접변환방식이므로 직류링크가 포함된 인버터 시스템에 비하여 변환효율이 높은 장점을 지니고 있다. 실제에 있어서는 입력측의 역을 고려하여 20Hz이하에서 운전하는 것이 보통이다. 주회로 구성에 있어 모두 36개의 스위칭소자가 소요되지만 다이리스터를 사용하기 때문에 수백~수천KVA 이상의 대용량이 되면 될수록 인버터 시스템의 경우보다 오히려 회로구성이 상대적으로 간단해 진다.

그림 2에 출력 1상분의 P군 콘버터의 6개 동작모드를 나타내었다. 각 모드는 3상 입력전원으로부터 출력측에 나타낼 수 있는 6가지 선간전압에 따라 구분된 것으로 출력전류가 양인 기간동안 각 모드는 순차적으로 동작한다. 모드 P-1에서 모드 P-2로의 전류(轉流)

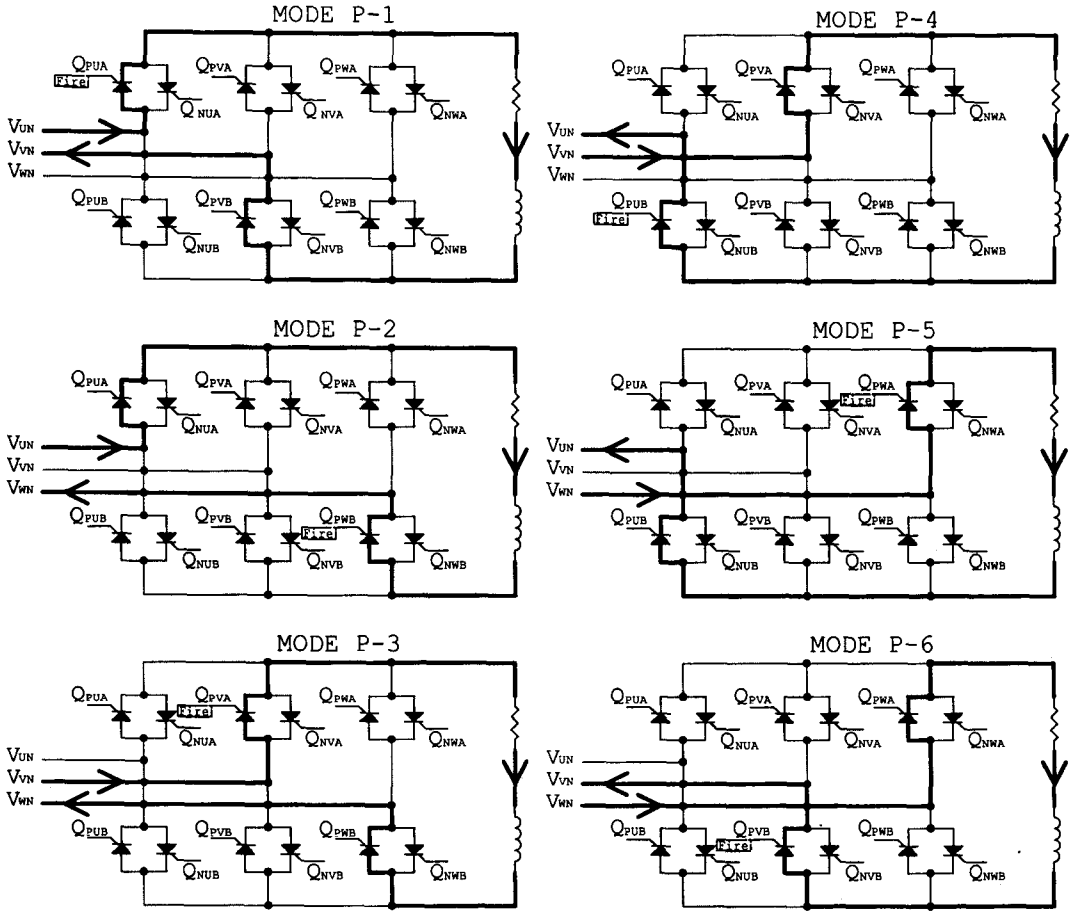


그림 2. P군 컨버터 동작모드
Fig. 2. Operating modes of P-converter.

를 위하여 다이리스터 Q_{PWB} 에 점호신호를 인가하여 턴-온 됨과 동시에 Q_{PVB} 가 턴-오프 되어야 하므로 이를 위하여 전원측의 전압은 W상의 전압이 V상의 전압보다 낮은 상태이어야 한다. 따라서 Q_{PWB} 의 점호 신호는 U상을 기준으로 $\frac{\pi}{2}$ 에서 $\frac{3}{2}\pi - \omega t_s$ 사이에서 인가되어야 하며 이 기간을 놓치면 전류(轉流)실패가 발생한다. 여기서 ω 는 전원 각주파수, t_s 는 다이리스터의 최소 전류여유시간이다.

2. 기존 교류전동기/사이크로컨버터 시스템의 전류 제어

일반적인 경우 사이크로컨버터의 출력제어는 기준전압 지령에 대하여 위상변조를 통한 전압출력의 변화로써 이루어지므로 사이크로컨버터에 의한 전동기 전류 제어시에는 전류제어를 위한 보상기가 필수적이다. 그

림 3은 통상적으로 적용 되어지고 있는 사이크로컨버터에 의한 전동기 구동시스템의 전류제어블럭도이다. 이에 적용되어지는 보상기들은 사이크로컨버터를 연속 시스템으로 가정하여 설계된 PI보상기 혹은 Phase-lag보상기 등이 주로 적용이 되고 있고 현대제어이론들을 이용하여 예측제어 등의 고정도 제어기술이 적용되기도 한다. 전자의 경우에는 출력주파수 범위가 광범위한 경우 적정한 보상기 이득 설정에 어려움이 따르게 되며 후자의 경우에는 제어기의 구성이 복잡해진다. 이 이외에 출력 주파수 변화에 따른 위상오차를 없애기 위하여 3상/2상 변환에 의하여 동기좌표계상에서 보상기를 구성하는 방법이 이용되기도 한다. 어떠한 경우이든지 실제 사이크로컨버터는 그 출력을 연속적으로 제어할 수 없는 이산시스템이고 샘플링시간 또

한 불규칙적이므로 이들 보상기의 설계는 컴퓨터 모의 실험 등을 통하여 그 특성을 확인하는 것이 요구되어진다. 그리고 정확한 전동기 역기전력의 검출 및 시스템 정수의 변동이나 외란 등의 영향을 보상하기 위하여는 복잡한 연산 알고리즘과 DSP등의 고속 연산기가 소요된다.

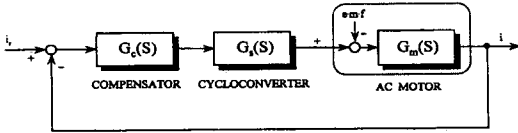


그림 3. 전동기 전류제어 블록도
Fig. 3. Block diagrams of motor current control.

3. 6 펄스 사이크로컨버터의 새로운 전류제어법
본 논문에서 제안하는 새로운 전류제어법은 사이크로컨버터의 출력전류가 지령전류를 직접적으로 추종하도록 점호신호를 발생시켜주는 방법으로써 부하의 상태나 여타의 시스템 정수의 변동에 상관없이 주어진 상황에서 최대한 빠르게 실제전류가 지령전류를 추종하도록 되어 있으며 전류제어를 위한 부가적인 보상기가 소요되지 않는다.

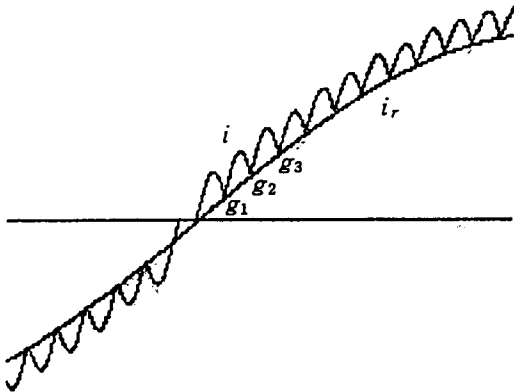


그림 4. 점호시점의 결정
Fig. 4. Decision of firing time.

그림 4는 제안하는 방법의 기본적 점호신호 발생방법을 보여주는 것으로 전류 오차가 영이되는 시점(g_1, g_2, g_3, \dots)에서 전류(轉流)를 시켜주면 그림에서와 같이 실제전류는 맥동을 하면서 지령전류를 추종하게 된다. 이 때 지령전류의 급격한 변화 또는 심한 부하 변동 등에 의하여 전류오차 영점이 발생하지 않는 경우에는 전류오차의 부호 및 출력전류 극성에 따라서

점호신호를 $a=0$ 또는 $a=\pi-\omega t_s$ 점에서 인가, 사이크로컨버터의 출력전압을 최대 또는 최소가 되도록하여 실제전류가 최대한 빠르게 지령전류에 근접할 수 있도록 한다.

이러한 기본 알고리즘은 다른 각종의 컨버터에도 적용이 가능한 것으로 단지 각각의 컨버터 동작 특성에 적합하도록 이를 실현해 주는 알고리즘만 변화되던 된다.

4. 제어 알고리즘

그림 5는 제안하는 새로운 전류제어법을 6펄스 사이크로컨버터에 적용하기 위한 제어 블록도이다. 먼저 초기 시동시 또는 P-N극 컨버터의 동작 교체시 해당 전류지령의 극성에 따라서 전류를 흘릴 수 있도록 이에 적합한 전압을 발생시켜 주어야 하므로 해당 시점에 있어 최대 또는 최소의 선간전압을 발생시키도록 한다. 이를 위하여는 매 순간 마다의 최대 또는 최소의 선간전압 발생에 대한 정보를 전원과 동기시켜 발생시키도록 한다. 초기 기동이 되면 전류오차 부호, 전류부호에 따라 전류오차 영점 또는 최대 혹은 최소 전압발생점에서 다음 동작모드로 전류(轉流)를 시켜서 전체적인 동작이 이루어진다.

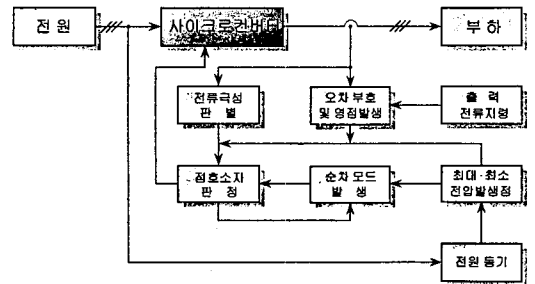


그림 5. 제안하는 전류제어 블록도
Fig. 5. Proposed current control block diagram.

표 1은 입력 전압의 크기에 따라 구분된 초기 동작 모드 및 전류(轉流)에 필요한 정보를 나타내는 것으로 초기 기동시에는 반드시 2개의 소자에 점호신호가 인가 되어야 전류를 흘릴 수 있으므로 이에 필요한 동시 투입하여야 할 소자도 함께 표시하였다. 실제 구현에 있어서는 ROM TABLE을 이용하면 간단하게 구성될 수 있다.

그림 6은 초기 동작 모드 결정 및 순차 모드 전환에 필요한 제어회로의 일례를 보여주는 것으로 사이크로컨버터의 출력제어에 널리 이용되고 있는 여현파 제

어법을 구현하는 경우 보다 회로구성이 상당히 간단해 질 수 있음을 알 수 있다. 또한 논리판단이 추가 되기 때문에 마이크로프로세서를 이용하여 구현하기에도 매우 용이할 것으로 판단된다.

표 1. 전류(轉流)조건

Table 1. Commutation conditions.

입력전압크기	동작모드	전류(轉流)	초기시 동시점호소자
$V_U > V_W > V_V$	MODE P-1	$Q_{PWA} \rightarrow Q_{PUA}$	Q_{PVB}
$V_U > V_V > V_W$	MODE P-2	$Q_{PVB} \rightarrow Q_{PWB}$	Q_{PUA}
$V_V > V_U > V_W$	MODE P-3	$Q_{PUA} \rightarrow Q_{PVA}$	Q_{PWB}
$V_V > V_W > V_U$	MODE P-4	$Q_{PWB} \rightarrow Q_{PUB}$	Q_{PVA}
$V_W > V_V > V_U$	MODE P-5	$Q_{PVA} \rightarrow Q_{PWA}$	Q_{PUB}
$V_W > V_U > V_V$	MODE P-6	$Q_{PUB} \rightarrow Q_{PVB}$	Q_{PWA}
$V_U > V_W > V_V$	MODE N-1	$Q_{NWB} \rightarrow Q_{NUB}$	Q_{NVA}
$V_U > V_V > V_W$	MODE N-2	$Q_{NVA} \rightarrow Q_{NWA}$	Q_{NUB}
$V_V > V_U > V_W$	MODE N-3	$Q_{NUB} \rightarrow Q_{NVB}$	Q_{NWA}
$V_V > V_W > V_U$	MODE N-4	$Q_{NWA} \rightarrow Q_{NUA}$	Q_{NVB}
$V_W > V_V > V_U$	MODE N-5	$Q_{NVB} \rightarrow Q_{NWB}$	Q_{NUA}
$V_W > V_U > V_V$	MODE N-6	$Q_{NUA} \rightarrow Q_{NVA}$	Q_{NWB}

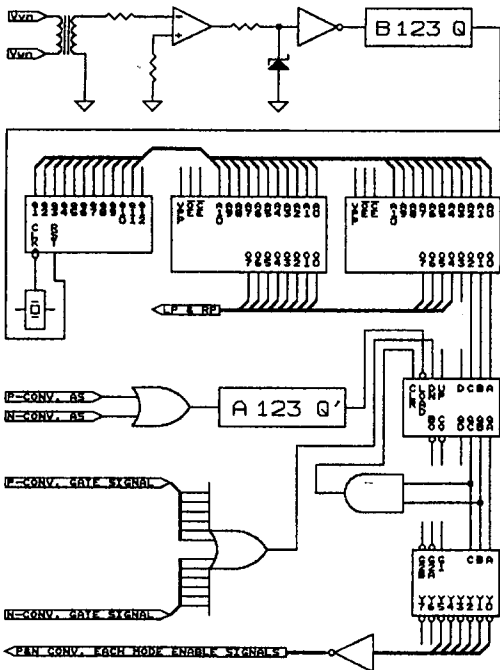


그림 6. 주요 제어회로도 일례
Fig. 6. Example of the control circuit.

5. 컴퓨터 모의실험 결과 및 고찰

모의실험을 RL수동부하에 제안한 전류제어법을 6펄스사이클로converter에 적용시켜 수행하였으며 이에 적용된 주요시스템정수들은 다음과 같다. 입력 선간전압 220V, 부하저항 5Ω, 부하인덕턴스 20mH, 지령전류 20~40A, 출력주파수 5~30Hz 등이다.

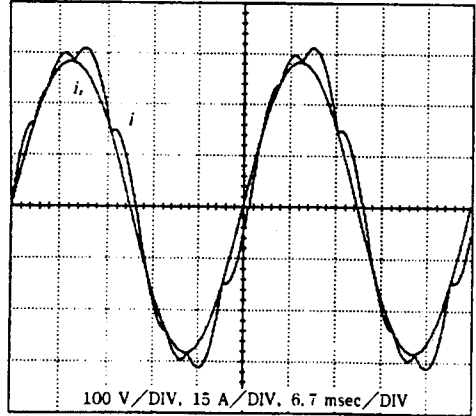


그림 7. 30Hz 출력시 전류파형
Fig. 7. Output current waveforms at 30Hz.

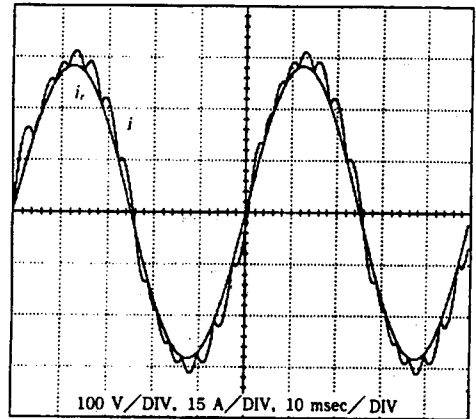


그림 8. 20Hz 출력시 전류파형
Fig. 8. Output current waveforms at 20Hz.

먼저 그림 7, 8, 9, 10은 30Hz, 20Hz, 10Hz, 5Hz의 출력전류지령에 대한 실제 전류파형으로 이때 출력전류는 최대출력의 값으로 하였다. 제안된 전류제어 알고리즘이 잘 적용되어 짐을 확인할 수 있다. 다만 초기동작시 최대의 선간전압을 발생시키므로 인하여 전류에 큰 맥동이 나타남을 알 수있는데 이는 출력주파수에 따라서 불규칙적으로 발생되며 본 모의실험에서는 부하를 고정으로 하였기 때문에 출력주파수가 낮

을수록 부하측 인덕턴스가 작게 되어 큰 맥동을 보이고 있으나 전체적인 면에서 볼 때 일시적인 현상으로서 이에 고조파함수는 미미한 것으로 출력전류에 대한 고조파 분석결과로 알 수 있었다.

류가 흘렀음을 알 수 있다.

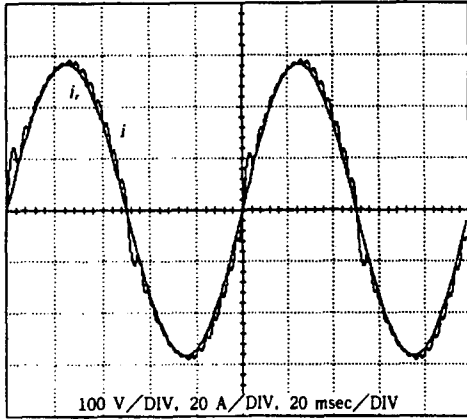


그림 9. 10Hz 출력시 전류파형
Fig. 9. Output current waveforms at 10Hz.

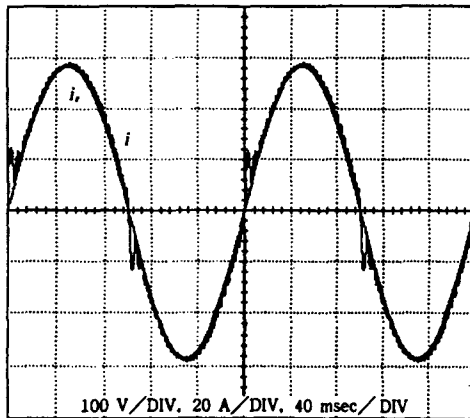


그림 10. 5Hz 출력시 전류파형
Fig. 10. Output current waveforms at 5Hz.

그림 11은 10Hz 출력시의 부하전압파형을 나타낸 것이며 그림 12, 13은 10Hz 출력시의 입력전압, 전류파형과 입력전류의 스펙트럼이다. 부하의 역율이 96%의 상태이고 출력전압비가 거의 1인 상태여서 다소 양호한 역율을 지니고 있음을 확인할 수 있다. 부하의 역율과 출력전압비가 낮아질수록 이와 더불어 입력측의 역율은 낮아지게 될 것이며 이는 일반적인 사이클로콘버터가 지니고 있는 최대의 단점이다. 그림 14는 10Hz 출력시 출력전류에 대한 고조파 분석결과로 전류맥동에 기인하여 지령전류 40A에 비하여 다소큰 전

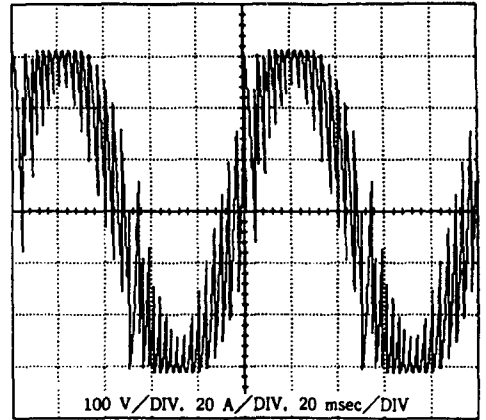


그림 11. 출력전압파형 (10Hz 출력시)
Fig. 11. Output voltage waveforms.(at 10Hz output)

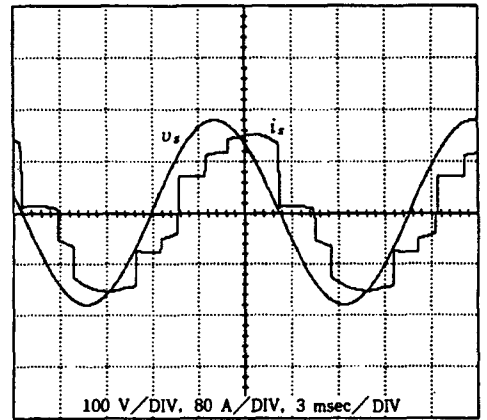


그림 12. 입력상전압, 전류파형 (10Hz 출력시)
Fig. 12. Input phase voltage and current waveforms. (at 10Hz output)

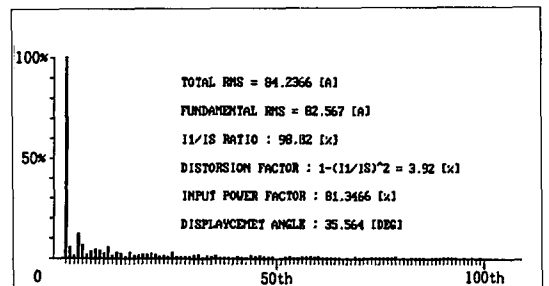


그림 13. 입력전류파형의 스펙트럼 (10Hz 출력시)
Fig. 13. Spectra of input current waveforms. (at 10Hz output)

이를 보상하는 방법에 대하여는 기 제안한 바 있으나^[7] 전동기의 제어알고리즘에 의하여 이러한 영향

은 자동적으로 보상되어 질 수 있으므로 본 연구에서는 전류맥동에 기인하는 전류오차 보상법은 적용하지 않았다.

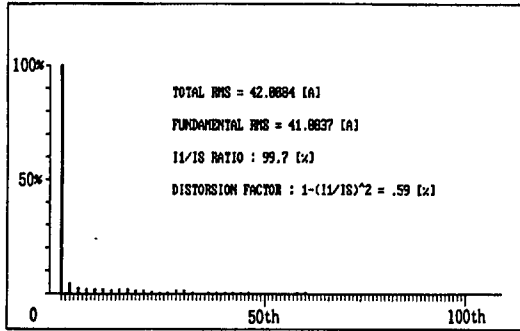


그림 14. 출력전류파형의 스펙트럼 (10Hz 출력시)
 Fig. 14. Spectra of output current waveforms. (at 10Hz output)

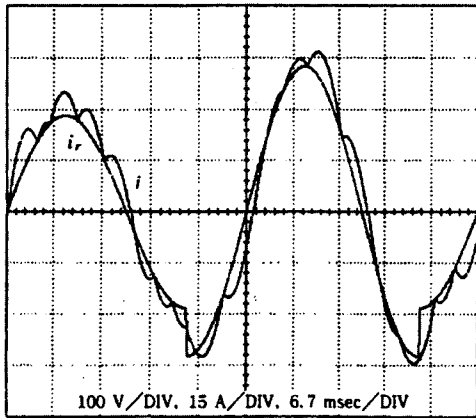


그림 15. 30Hz 출력시 과도상태 전류파형
 Fig. 15. Output current waveforms in transient states at 30Hz.

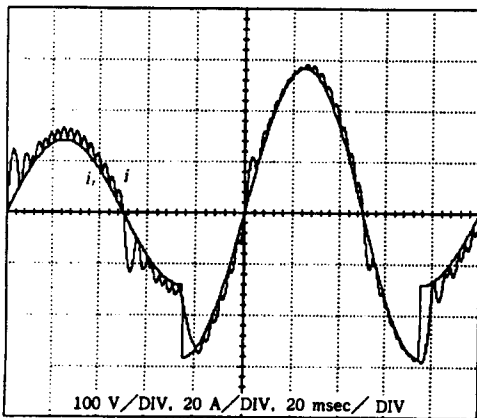


그림 16. 10Hz 출력시 과도상태 전류파형
 Fig. 16. Output current waveforms in transient states at 10Hz.

출력전류에 포함된 고조파는 미미하여 전동기 토오크에 맥동을 미칠 정도는 못되는 것으로 판단되며, 고조파 분석을 통한 계산 결과 지령전류의 위상과 출력전류 기본파분의 위상은 정확히 일치된 상태를 확인하였다. 마지막으로 그림 15, 16은 각각 30Hz, 10Hz 출력시 전류지령의 크기 변화에 대한 전류추종을 나타내는 것으로 과도상태에서도 그 추종능력이 우수함을 알 수 있다.

III. 결 론

본 연구에서는 대용량전동기의 가변속구동에 적용이 적합한 6펄스 사이크로컨버터에 대한 새로운 전류제어법을 제안, 이의 알고리즘을 소개하였으며 RL부하에 대한 컴퓨터 모의실험을 수행한 결과로서 제안한 새로운 전류제어법은 높은 주파수 출력시에는 다소 위상 지연이 있으나 20Hz 이하의 경우에 있어서는 위상 지연도 거의 없이 잘 추종하고 있음을 알 수 있었다. 또한 과도상태에 있어도 최대한 빠르게 지령전류를 추종함을 확인 할 수 있었다.

따라서 본 전류제어법을 적용하여 벡터제어법과 같은 전동기의 고성능 가변속 제어를 실현한다면 우수한 결과를 가져올 것으로 판단되어진다.

추후 연구과제로는 시스템 제작에 의하여 유도전동기 저속 벡터제어 실험을 수행하는 것과 초기동작시 발생하는 큰 전류 맥동을 줄이기 위하여 현재 최대 또는 최소 선간전압으로 기동되는 알고리즘을 수정, 보완하여 적당한 크기의 전압 선택 및 그 이후의 정상동작 알고리즘의 보완에 관한 알고리즘을 개발하는 것이다.

참 고 문 헌

[1] T. TAGUCHI, K. AIDA, K. MUKAI, T. YANAGISAWA, T. KANAI, "Variable Speed Pumped Storage Fed by Large-Scale Cycloconverter", EPE FIRENZE, pp. 2-237~2-242, 1991.
 [2] THEODOR SALZMANN, "Cycloconverters and Automatic Control of Ring Motors Driving Tube Mills", SIEMENS REVIEW vol. XLV, no. 1, pp. 3-8, 1978
 [3] TAKAYOSHI NAKANO, HIRISHI OH-

SAWA, KAZUYA ENDOH, "A High-Performance Cycloconverter-Fed Synchronous Machine Drive System", IEEE Trans. IA, vol. IA-20, no. 5, pp. 1278-1284, September/October, 1984.

[4] TAKASIGE SAIJO, SHIGEYOSHI KOIKE, SUSUMU TADAKUMA, "Characteristics of Linear Synchronous Motor Drive Cycloconverter for Maglev Vehicle ML-500 at Miyazaki Test Track", IEEE, Trans. IA, vol. IA-17, no. 5, pp. 533-543, Septemver/October, 1981.

[5] SUSUMU TADAKUMA, YOSHIAKI TAMURA, "Current Response Simulation in Six-Phase and Twelve-Phase Cycloconverters", IEEE, Trans. IA, vol. IA-15, no. 4, pp. 411-419, July/August, 1979.

[6] ISAO TAKAHASHI, MASAHIKI NULO-KAWA, "Prediction Control for a Cycloconverter of a Power Distortion Compensation System", Ieee, Trans. IA, vol. 25, no. 2, pp. 348-355, March/April, 1989.

[7] 김영석, 조규민, "고주파 LC 탱크회로를 이용한 사이크로콘버터의 새로운 전류제어법", 대한전기학회 논문지 42권 3호, pp. 7-18, 1993

[8] 조규민, 김영석, "교류전동기 가변속 구동을 위한 LC 공진회로를 이용한 사이크로콘버터 전류 제어 시스템", 대한전기학회 논문지 43권 9호, pp. 1450-1462, 1994

저 자 소 개

崔正秀(正會員) 第34卷 S編 第6號 參照

曹圭玟(正會員) 第34卷 S編 第6號 參照



金榮石(正會員)
 1951년 6월 11일생. 1977년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 일본 나고야대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1987년 ~ 1989년 한국전기연구소 선임연구원, 실장. 현재 인하대 공대 전기공학과 부교수.