

LC 고주파공진회로를 이용한 사이크로컨버터에 의한 유도전동기의 벡터제어

최정수* 조규민 김영석
인하대학교 전기공학과

Vector Control of IM with The Cycloconverters using High Frequency LC Resonant Circuits

Choi Jung-soo, Cho Kuy-min, Kim young-seok
Dept. of Electrical Eng. Inha Univ.

Abstract

In this paper, rotor flux feedforward control of induction motor fed by cycloconverters with high frequency LC resonant circuits is presented. The cycloconverter using new current control algorithm as a power source of induction motor drive system is proposed. And then its validity of the application to induction motor control system is verified by experimental results.

1. 서론

최근의 산업용 전동기 구동분야에 전동기의 내마모성, 내환경성, 보수유지의 잇질 등의 이유로 유도전동기의 사용이 요구되고 있으며 유도전동기의 순시토크 제어를 위하여 자기소호형 소자를 이용한 인버터가 구동용 전원으로 주로 사용되어 왔다. 그러나 인버터의 사용은 입력측에 발생하는 무효전력과 고조파에 의한 입력역율의 저하, 간접변환방식에 의한 변환효율의 저하 등이 지적되며 대용량기기의 제어에 사용하기에는 DC LINK의 제작이 용이하지 않다는 단점이 있다. 이에 필자들은 본 연구에 앞서 2대의 사이크로컨버터를 LC 병렬 공진회로로 연계하여 입력 전류파형도 정현파에 가깝게 하고 입력중합역율이 거의 1에 가까운 사이크로컨버터를 제안하였다.^[1] 또한 사이크로컨버터의 지령전류를 직접추종하게 하는 지령전류 직접추종형 알고리즘을 개발하여 수동부하를 대상으로 0~수백 Hz의 출력으로 전류제어를 행한 바 있다.^{[2][3]} 본 연구에서는 유도전동기의 가변속구동을 위하여 슬립주파수 제어형 벡터 제어 알고리즘과 제안한 지령전류 직접추종형 전류제어 알고리즘을 적용한 사이크로컨버터를 유도전동기 구동용전원으로 사용하여 유도전동기의 속도제어를 행하였다. 실험의 결과로부터 제안한 지령전류 직접추종형 전류제어 알고리즘을 적용한 고주파 공진회로를 이용한 사이크로컨버터가 유도전동기 구동용전원으로써 우수한 성능을 갖고 있음을 입증하였다.

2. 본론

2.1 LC공진회로를 이용한 사이크로컨버터

그림 1에 사이크로컨버터의 주회로를 나타내었다. 고주파 LC 병렬공진 탱크회로를 중심으로 입,출력 사이크로컨버터가 병렬로 접속되어 있다. 입력 필터는 전류의 평활화와 사이크로컨버터의 저주파측에 발생하는 전압의 위상과 진폭을 제어하여 부하에 관계없이 입력 기본파 역율을 1로 제어한다.

탱크회로는 고주파전력을 출력사이크로컨버터에 전달할 뿐만 아니라 사이크로컨버터의 전류용전원으로써 사용되며 탱크회로의 주파수는 수kHz로 구동된다. 그림 1에서 탱크회로의 공진전압은 전류(commutation)용 전원으로 사용되기 때문에 탱크를 기준으로 각각 전원과 부하로 흐를 때를 고주파 및 저주파 기준전류의 정방향으로 정의하였다. 입,출력사이크로컨버터는 각각 저주파측(입력의 경우 전원으로, 출력의 경우 부하로)으로 전류(commutation)가 행하여지므로 입,출력 구별없이 동일한 제어 알고리즘이 적용되어 질 수 있다.

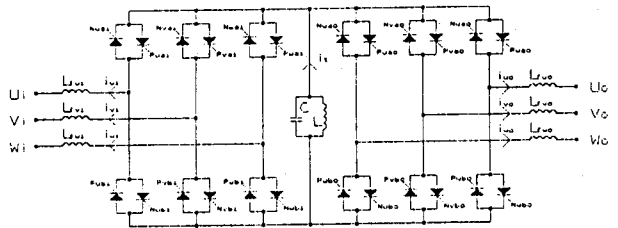


그림 1. 사이크로컨버터의 주회로

2.2 지령전류 직접추종형 전류제어 알고리즘

제안하는 사이크로컨버터의 전류제어 알고리즘은 출력전류가 지령전류를 직접 추종하게 하는 새로운 전류제어법으로 사이크로컨버터의 출력전류가 맥동하는 성질을 이용하여 전류오차가 영인 시점에서 점호신호를 발생시켜 전류(commutation)를 행하도록 하는 기본원리로 구성된 전류제어방법이다.

그림 2는 전원전압 V_1 , 저주파전압 V_2 , 필터 양단의 전압 V_{U1} 와 저주파전류 i 의 파형을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 사이크로컨버터 저주파측 전류는 필터인덕턴스의 작용으로 입력전압(출력의 경우는 여기전력)과 사이크로컨버터 저주파전압의 차이의 적분치로 나타난다. 전류가 탱크회로의 두배의 주파수로 맥동하는 성질을 이용하여 그림 3에 나타난 바와 같이 지령전류 i_d 와 맥동하는 실제전류 i 의 매 교점에서 전류(commutation)를 행하면 된다. 그러나 이러한 알고리즘은 지령값과 실제값 사이에 교점이 발생하지 않을 경우와 탱크전압의 두개의 상(a,b)중 어느 상으로 전류를 행할 것인가를 고려하여 구성되어야 한다. 표 1에 탱크전압의 두 상중 어느 상으로 전류를 행할 것인가를 나타내었다.

그림 4는 전류오차영점이 발생하지 않을 경우를 나타낸다.

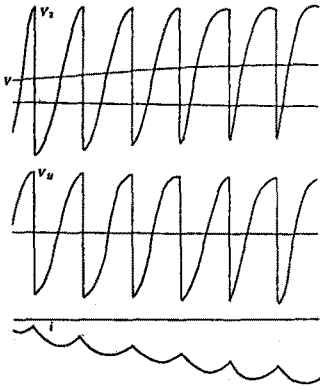


그림 2. 필터인덕턴스축의 전압, 전류파형

그림(a)의 전류가 양이고 실제전류가 지령전류에 대하여 부족할 경우에는 최대전압을 발생하는 시간점에서 점호하여 전류가 최대한 증가할 수 있도록 하고 (b)의 전류가 양이고 실제전류가 지령전류보다 큰 경우에는 최소전압을 발생하는 시점에서 점호를 행하여 최대한 감소하도록 저주파전압을 발생시키면 된다. 전류가 음인 경우도 이와 같은 원리로 전류를 행하면 된다. 마지막으로 사이크로컨버터의 동작군이 바뀌게 되는 경우에는 일정 유지기간 뒤에 P 또는 N군의 동작개시 점호신호를 발생하고 전류가 일단 흐르게 한 뒤에 교차되는 영역에서 점호신호를 발생하여 동작하도록 한다.

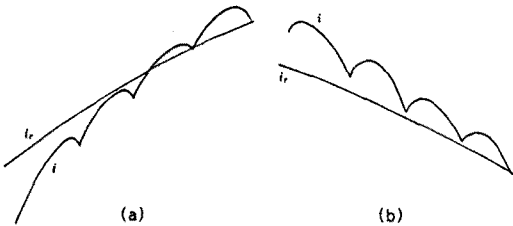


그림 4. 전류오차 영점이 발생하지 않을 경우 점호시점의 결정

이상과 같은 전류제어 알고리즘은 연산이라도 여현파제어법에 의한 순시전류제어 개념을 도입한 제어알고리즘에서 전류오차 피드백이득 K를 무한대로 하여준 경우의 제어성능을 나타내며 정상상태는 물론 과도상태에서도 우수한 전류 추종능력을 갖고 있다.

2.3 슬립주파수 제어형 벡터제어 알고리즘

본 연구에서는 2차자속 ψ 를 일정하게 놓고, d_q 좌표계상에서의 고정자전류를 d_q 축성분 전류는 2차자속축에 일치시켜 자속성분 전류로, q 축성분 전류는 그와 수직인 토오크성분 전류로 나누어 자속 및 토오크를 제어하고 연산치 ω_{sl}^* 과 실속치 ω_r 로부터 2차자속의 위치를 구하여 고정자 전류를 제어하는 슬립주파수 제어형 벡터제어법을 이용하여 3상유도전동기를 제어한다.

동기속도로 회전하는 d_q 좌표계에서의 고정자 전류벡터와 2차자속벡터의 관계는 그림 5와같다.

그림 5에서 ω_r 로 회전하는 d_q 좌표 상에서의 고정자전류의 진폭 및 위상은 식 (1)과 같으며

$$\begin{aligned} i_{d1}^* &= \sqrt{i_{dcl}^{*2} + i_{qcl}^{*2}} \\ \alpha &= \tan^{-1}\left(\frac{i_{qcl}^*}{i_{dcl}^*}\right) \end{aligned} \quad (1)$$

동기속도로 회전하는 2차자속 좌표계에서의 전압방정식은

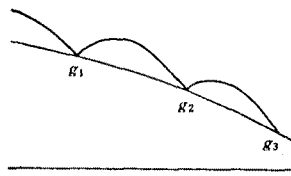


그림 3. 점호시점의 결정

저주파전류	탱크전압	전류상황
$i > 0$	$v_a > 0$	$v_b \rightarrow v_a$
	$v_b > 0$	$v_a \rightarrow v_b$
$i < 0$	$v_a < 0$	$v_b \rightarrow v_a$
	$v_b < 0$	$v_a \rightarrow v_b$

표 1. 전류조건

$$\begin{bmatrix} V_{de} \\ V_{qe} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_s & pM & -\omega M \\ \omega L_s & R_s + pL_s & \omega M & pM \\ pM & -(\omega - \omega_r)M & R_r + pL_r & -(\omega - \omega_r)L_r \\ (\omega - \omega_r)pM & (\omega - \omega_r)L_r & R_r + pL_r & \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{dcl} \\ i_{qcl} \\ i_{dcl} \\ i_{qcl} \end{bmatrix} \quad (2)$$

가 된다. 또한 유도전동기의 순시torque는 전류와 자속벡터와의 외적에 의하여 구하여지며 3상유도전동기의 순시토오크식

$$T = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)(\psi_{de2} i_{qe2} - \psi_{qe2} i_{de2}) \quad (3)$$

가 된다. 여기서 P는 극수이다.

순시토오크식은 i_{de2} 과 i_{qe2} 의 관계로

$$T = \left(\frac{3}{2}\right)\left(\frac{P}{2}\right)\left(\frac{M}{L_2}\right)\psi_{de2} i_{qe1} \quad (4)$$

와 같이 표현할 수 있다.

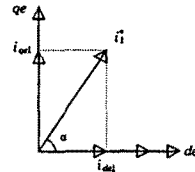


그림 5 동기속도로 회전하는 좌표계

식 (4)로부터 토오크성분전류 i_{qe1} 을 타여자 직류전동기의 전기자전류에 대응시켜 유도전동기의 토오크를 제어할 수 있음을 알 수 있다. 이때 2차자속의 크기 $|\psi_2| = \sqrt{\psi_{de}^2 + \psi_{qe}^2}$ 를 일정한

로 하여 제어하므로 de축을 자속축에 일치시키면 $\psi_{qe} = 0$ 이 된다. 이것과 $\omega_{sl} = \omega - \omega_r$ 의 관계 및 회전자의 전압방정식으로부터 다음의 식 (5)를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{qcl}^* &= \left(-\frac{4}{3P}\right)\left(\frac{L_2}{M}\right)\frac{T_r^*}{\psi_2^*} \\ i_{dcl}^* &= \frac{\psi_2^*}{M} \\ \omega_{sl}^* &= \left(-\frac{4}{3P}\right)R_2\left(\frac{T_r^*}{\psi_2^{*2}}\right) \\ 0 &= \int (\omega_{sl}^* + \omega_r) dt + \alpha \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)로부터 고정자전류의 지령치를 구하고 2상 → 3상변환을 거쳐서 3상분지령전류를 구하면

$$\begin{aligned} i_{u1}^* &= \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{i_{dcl}^{*2} + i_{qcl}^{*2}} \sin\theta_1^* \\ i_{v1}^* &= \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{i_{dcl}^{*2} + i_{qcl}^{*2}} \sin\left(\theta_1^* - \frac{2\pi}{3}\right) \\ i_{w1}^* &= \sqrt{\frac{2}{3}}\sqrt{i_{dcl}^{*2} + i_{qcl}^{*2}} \sin\left(\theta_1^* + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \quad (6)$$

이 된다.

2.4 실험결과 및 고찰

본 연구에서 제안한 사이크로컨버터의 제어블럭도를 그림 6에 나타내었다. 그림 6의 입력사이크로컨버터의 제어알고리즘에 안정된 탱크전압을 유지하기위해 탱크전압조정 알고리즘이 포함되어 있다. 구현된 시스템은 입,출력 사이크로컨버터에

지령전류 직접추종형 전류제어 알고리즘을 적용하였으며 슬립 주파수 제어형 벡터제어 알고리즘은 16비트 마이크로프로세서로서 연산을 수행하도록 하였다. 그림 7에 슬립주파수 제어형 벡터제어 알고리즘을 블록도로 나타내었다.

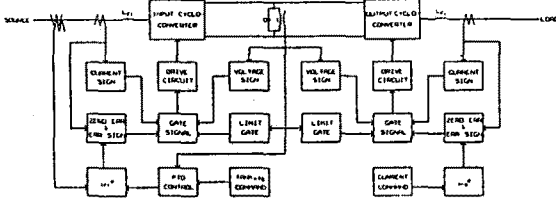


그림 6. 사이크로컨버터 제어블럭도

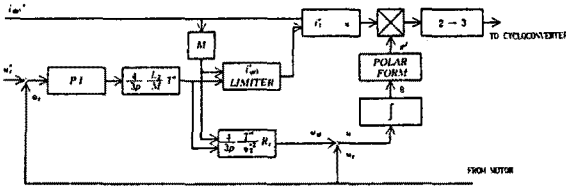


그림 7. 슬립주파수 제어형 벡터제어 알고리즘 블럭도

실험에 사용된 시스템정수는 입력 상전압 50V, 탱크전압지령은 200V, 필터인덕턴스 10mH이며 사용된 3상 유도전동기는 정격 220V, 8.3A, 1720 rpm, 2.2Kw, 4극이며 $R_1 = 1\Omega$, $R_2 = 0.68\Omega$, $L_1 = 108mH$, $L_2 = 100mH$, $M = 100mH$ 의 정수를 갖고있다. 그림 8은 630 rpm 운전시 입력전압의 전압, 전류파형으로 전압과 전류는 거의 동상이며 전류파형 또한 정형파에 가까우므로 입력역율이 매우 양호한 것으로 평가된다. 그림 9는 탱크전압, 전류파형을 나타낸다. 그림 10는 지령전류에 대한 유도전동기에 흐르는 부하전류의 파형으로 지령전류의 급격한 변화에도 우수한 추종을 나타내고 있다. 그림 11은 630 rpm으로 기동시킨 경우의 전동기 기동특성 및 상전류파형을 나타내며 870ms만에

정상상태를 유지함을 알 수 있다. 그림 12은 630 rpm으로 기동 및 630 rpm에서 1021 rpm으로의 가속특성을 보이고있다. 그림 13는 630 rpm에서 1021 rpm으로의 가,감속실험시의 속도지령, 속도응답 및 상전류의 파형으로 가속시에는 400ms 만에 정상상태에 도달하고 감속시에는 180ms에 정상상태에 도달한다.

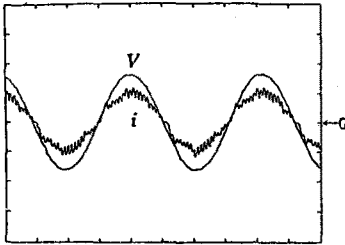
3. 결론

본 연구에서 필자들은 이상과 같은 실험을 행한 결과로 제한한 전류제어 알고리즘을 적용한 사이크로컨버터의 전류추종능력이 우수하여 유도전동기의 속도제어에 요구되는 급격한 전류 변화에 오차없이 추종함을 나타냄을 확인할 수 있었고 유도전동기 제어용전원으로서 매우 적합하다는 것이 입증되었다. 또한 기존의 사이크로컨버터 출력주파수보다 높은 출력주파수를 갖으므로 유도기의 고속구동도 가능하며 인버터에 의한 전동기 제어에 비하여 입력종합역율이 1에 가까워 역률개선의 효과와 대응장기의 구동 및 기타 전류제어용 전원으로 대체가능한 장점을 지니고 있다. 급후 연구과제로는 DSP등의 고속연산을 사용하여 2차자속추정과 전동기 파라미터변동을 고려한 적응음저버 센서리스 제어를 행하는 것이며 LC 탱크회로를 검토하여 대응장기 제어에 적용하여 실험을 행하는 것이다.

본 연구는 "한국전력공사의 대학 기초연구 지원사업"에 의하여 수행된 결과임.

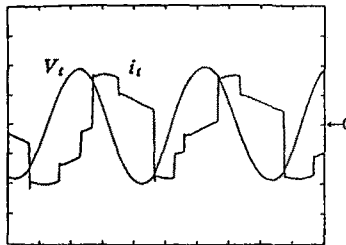
참고문헌

- [1] 김 영석, 조 규민, "공진회로를 이용한 사이크로컨버터에 의한 유도전동기 구동" 대한전기학회 논문지 41권 2호 PP.123-134, 1992
- [2] 김 영석, 조 규민, "고주파 LC 탱크회로를 용한 사이크로컨버터에 새로운 전류제어법", 대한전기학회 논문지 42권 3호 pp. 7-18, 1993
- [3] 김 영석, 조 규민, 최 정수, "고주파 LC 공진회로를 이용한 유도전동기 구동용 사이크로컨버터의 전류제어에 관한 연구", 전력전자 연구 발표회, 14회, PP. 46-50, 1993



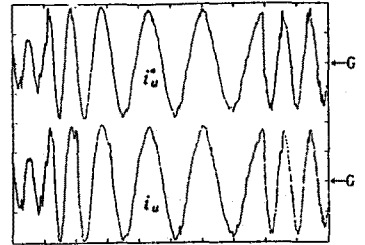
50V/div, 10A/div, 2ms/div

그림 8. 630 RPM 운전시 입력전압, 전류파형



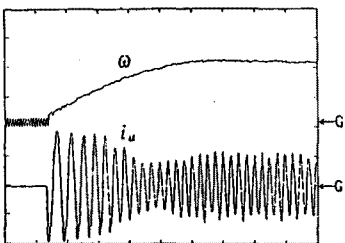
150V/div, 20A/div, 200μs/div

그림 9. 탱크전압, 전류파형



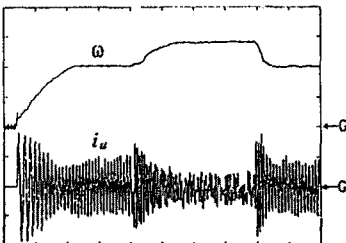
5A/div, 2ms/div, 100ms/div

그림 10. 지령전류변화에 따른 부하전류



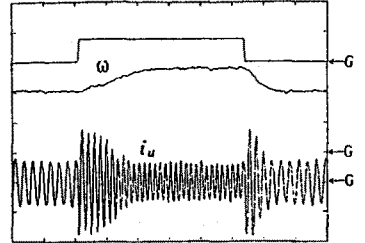
300rpm/div, 5A/div, 200ms/div

그림 11. 전동기 기동특성 및 상전류파형



350rpm/div, 5A/div, 500ms/div

그림 12. 기동 및 가속특성



350rpm/div, 5A/div, 200ms/div

그림 13. 기동 및 가, 감속특성