

Matrix Converter로 구동되는 유도전동기 구동장치를 위한 전력이론을 이용한 간단한 센서리스 기법

이 교범, 김 원상
전북대학교 전자정보공학부

Sensorless Scheme for Induction Motor Drives Fed by a Matrix Converter Using Power Theory

Kyo-Beum Lee, Won-Sang Kim
Division of Electronics & Information Engineering, Chonbuk National University

Abstract - 본 논문은 전동기의 일정한 공극자속과 전동기에 유입되는 무효전력을 이용한 매트릭스 컨버터 구동장치의 새로운 간단한 센서리스 기법을 제안한다. 저속의 센서리스 성능 향상을 위해 정류지연, 스위칭장치의 턴-온, 턴-오프시간 그리고 스위칭장치의 온-상태에서 전압강하와 같은 매트릭스 컨버터의 비선형성을 PQR 전력변환을 이용하여 모델링하고 기준 전류제어기법을 이용하여 보상한다. 3 kW급의 매트릭스 컨버터 구동시스템에 적용하여 제안된 센서리스 기법의 타당성을 검증한다.

산하고 기준전류제어방법을 이용하여 보상하는 방법을 소개한다. 3 KW급의 매트릭스 컨버터에 적용한 실험결과들은 제안된 관측기의 타당성을 보여준다.

2. 일정 공극자속 운전과 PQR 전력변환

2.1 일정 공극자속 운전

유도전동기는 다음과 같이 표현된다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{ds}^e - \omega_r \lambda_{qs}^e, v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qs}^e + \omega_r \lambda_{ds}^e$$

$$0 = R_r i_{dr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{dr}^e - (\omega_r - \omega_e) \lambda_{qr}^e, 0 = R_r i_{qr}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qr}^e + (\omega_r - \omega_e) \lambda_{dr}^e \quad (1)$$

여기서 첨자 'e'는 dq-회전좌표계이고 v_{ds}^e 와 v_{qs}^e 는 d축과 q축 고정자전압, i_{ds}^e 와 i_{qs}^e 는 d축과 q축 고정자전류, i_{dr}^e 와 i_{qr}^e 는 d축과 q축 회전자전류, λ_{ds}^e 와 λ_{qs}^e 는 d축과 q축 고정자자속, λ_{dr}^e 와 λ_{qr}^e 는 d축과 q축 회전자자속, R_s 는 고정자저항, R_r 는 회전자저항, ω_r 는 동기자속도이고 ω_e 는 회전각 속도이다.

자속방정식은 다음과 같다.

$$\lambda_{ds}^e = \lambda_{dm}^e + L_{ls} i_{ds}^e, \lambda_{qs}^e = \lambda_{qm}^e + L_{ls} i_{qs}^e$$

$$\lambda_{dr}^e = \lambda_{dm}^e + L_{lr} i_{dr}^e, \lambda_{qr}^e = \lambda_{qm}^e + L_{lr} i_{qr}^e$$

$$\lambda_{dm}^e = L_m (i_{ds}^e + i_{dr}^e), \lambda_{qm}^e = L_m (i_{qs}^e + i_{qr}^e) = L_m i_{qm}^e \quad (2)$$

여기서 λ_{dm}^e 와 λ_{qm}^e 는 d축과 q축 공극자속, i_{dm}^e 와 i_{qm}^e 는 d축과 q축 자화전류, L_{ls} 와 L_{lr} 는 고정자와 회전자 누설인덕턴스, L_m 는 자화인덕턴스이다. (1)를 (2)를 이용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} (\lambda_{dm}^e + L_{ls} i_{ds}^e) - \omega_e (\lambda_{qm}^e + L_{ls} i_{qs}^e)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} (\lambda_{qm}^e + L_{ls} i_{qs}^e) + \omega_e (\lambda_{dm}^e + L_{ls} i_{ds}^e) \quad (3)$$

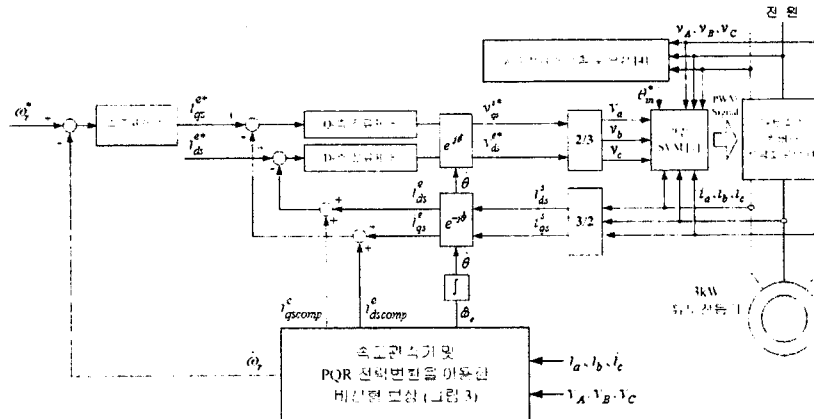
벡터제어가 적절히 이루어져서 제어샘플링주기 동안 회전좌표계에서 d축과 q축 고정자전류의 시간변화율을 영으로 가정한다면 (3)은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{dm}^e - \omega_e (\lambda_{qm}^e + L_{ls} i_{qs}^e)$$

$$v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \frac{d}{dt} \lambda_{qm}^e + \omega_e (\lambda_{dm}^e + L_{ls} i_{ds}^e) \quad (4)$$

공극자속 λ_{dm}^e 와 λ_{qm}^e 의 변화율과 관계하는 항목을 무시한다면 (4)는 다음과 같이 다시 정리될 수 있다.

$$v_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - \omega_e (\lambda_{qm}^e + L_{ls} i_{qs}^e), v_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \omega_e (\lambda_{dm}^e + L_{ls} i_{ds}^e) \quad (5)$$



<그림 1> 제안하는 매트릭스 컨버터 구동시스템의 센서리스 벡터제어 블록도

고정자저항의 전압강하가 무시된다면

$$|v_s| \approx |v_{emf}| \approx |\lambda_m \omega_e = L_m i_m| \omega_e \quad (6)$$

여기서 v_{emf} 는 역기전력의 전압 강하 크기를 나타낸다. 만약 동기좌표축에서 공극자속과 고정자 전류의 변화가 일정하다면, ω_e 는 자화전류와 공극전압의 값으로부터 계산될 수 있다.

일정 공극자속과 전동기에 유입되는 전력을 이용한 새로운 관측기는 무효전력을 기반으로 생성되었기 때문에 유효전력의 흐름으로 표시되는 저항에 대해서는 크게 영향을 받지 않는다. 또한 제안한 알고리즘은 간단하여 실제 산업현장에서 응용하기에 용이하다는 장점이 있다.

2.2 PQR 전력변환

PQR 좌표계에서 전압은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{bmatrix} v_p \\ v_q \\ v_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0dqqs}^s} \begin{bmatrix} v_0^s & v_{ds}^s & v_{qs}^s \\ 0 & -v_{0dqqs}^s v_{qs}^s / v_{dqqs}^s & v_{0dqqs}^s v_{ds}^s / v_{dqqs}^s \\ v_{dqqs}^s & -v_0^s v_{ds}^s / v_{dqqs}^s & -v_0^s v_{qs}^s / v_{dqqs}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0^s \\ v_{ds}^s \\ v_{qs}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_{0dqqs}^s \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (7)$$

여기서 $v_{dqqs}^s = \sqrt{v_{ds}^s{}^2 + v_{qs}^s{}^2}$ 그리고 $v_{0dqqs}^s = \sqrt{v_0^s{}^2 + v_{ds}^s{}^2 + v_{qs}^s{}^2}$. abc좌표에서 출력전류들은 다음과 같이 PQR좌표로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} i_p \\ i_q \\ i_r \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{0dqqs}^s} \begin{bmatrix} v_0^s & v_{ds}^s & v_{qs}^s \\ 0 & -v_{0dqqs}^s v_{qs}^s / v_{dqqs}^s & v_{0dqqs}^s v_{ds}^s / v_{dqqs}^s \\ v_{dqqs}^s & -v_0^s v_{ds}^s / v_{dqqs}^s & -v_0^s v_{qs}^s / v_{dqqs}^s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0^s \\ i_{ds}^s \\ i_{qs}^s \end{bmatrix} \quad (8)$$

순시유효전력 P는 전압과 전류의 스칼라 곱으로 정의된다.

$$P = v_p i_p \quad (9)$$

순시무효전력 Q_q 와 Q_r 는 전압과 전류벡터의 벡터곱으로 정의된다.

$$Q_q = -v_p i_r, Q_r = v_p i_q \quad (10)$$

r축 전류 i_r 은 q축 순시무효전력 Q_q 에 기여하고 q축 전류 i_q 는 r축 순시무효전력 Q_r 에 기여한다. 3개의 전력들은 선형적으로 서로 독립적이다. 그러므로 3개의 전류성분들은 각각의 3개 순시전력을 보상함으로써 독립적으로 제어될 수 있다.

3. 속도관측기의 설계

3.1 속도관측기

순시 유효전력 P는 전동기의 수정된 회전자 슬립 저항과 자장에 저장된 에너지에서 소비되는 유효전력이고, 무효전력 Q는 동기에서 자속의 가속벡터 또는 순시 크기변화율과 관계가 있다. 정상상태에서 Q는 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$Q_r \approx -i_m |v_{emf}| \quad (11)$$

(11)은 (10)을 이용해서 다시 표현할 수 있다.

$$Q_r = L_m^2 (\omega_r + \omega_{sl}) \quad (12)$$

(19)를 이용하여 (6)을 ω_r 로 다시 정리하면,

$$\omega_r = -\frac{v_p i_q}{L_m i_m^2} - \omega_{sl} \quad (13)$$

여기서 $\omega_{sl} = \frac{i_p}{\tau_r i_m}$, $\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$, ω_{sl} 은 슬립주파수이고 τ_r 은 회전자시정수이다.

p축전압 v_p 와 q축 전류 i_q 는 (7)과 (8)로 계산될 수 있다. 그림 2는 PQR 전력변환, 속도관측기와 기준전류제어로 구성되는 제안한 제어기법을 나타낸다.

매트릭스 컨버터가 더 이상 이상적이지 않다고 가정하면 매트릭스 컨버터의 비선형성은 특히 저속에서 전압의 심한 왜곡을 일으킬 수 있다[4]. 따라서 저속영역에서 속도추정정능의 향상을 위해 매트릭스 컨버터에 관한 비선형성을 보상해주어야 한다.

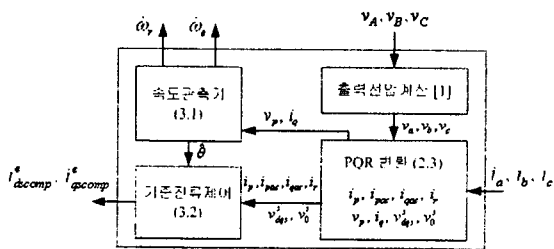


그림 2 전력이론을 이용한 속도관측기

3.2 저속영역 성능향상을 위한 비선형성 모델링

앞장에서 언급한 바와 같이 매트릭스 컨버터의 비선형성은 출력전압 왜곡을 야기하고 r축 무효전력(Q_r) 왜곡과 속도리플을 발생한다. 전환지연, 온-상태에서 전압강하와 전류극성은 동작조건에 따라 변할 뿐 아니라 정류지연과 전압강하를 측정하기 어렵고 상전류가 영으로 근접했을 때 전류부호를 결정하기가 어렵기 때문에 오프라인방법으로 매트릭스 컨버터의 비선형성을 보상하기 어렵다. 이러한 문제들을 해결하기 위해 본 논문에는 PQR 변환을 이용하는 온라인 비선형성 보상방법을 적용하였다[4]. 매트릭스 컨버터 전류가 평형이고 정현파라면 i_p 과 i_q 는 단지 dc성분을

구성하고 i_r 은 영이다. 전류가 매트릭스 컨버터의 비선형성에 의해 불평형되고 왜곡될 때 전류의 불평형성분과 고조파성분이 i_p , i_q 와 i_r 에 존재한다. 이러한 불평형과 왜곡을 제거하기 위해서 기준전류제어방법을 적용한다[4]. 적용한 매트릭스 컨버터의 비선형성 보상 성능 평가를 위해 시뮬레이션을 수행하였고 그림 3은 그 결과파형을 나타낸다. 매트릭스 컨버터의 비선형성은 전기적인 주파수의 대략 6배가 되는 속도 맥동을 야기하지만 0.5초 후 보상기법이 적용된 후부터는 거의 제거된다.

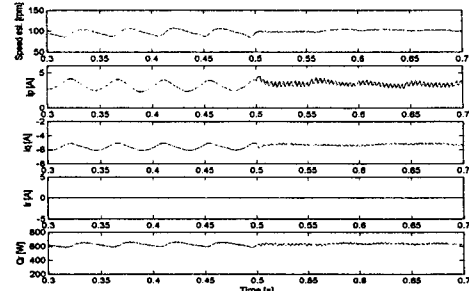


그림 3 100 rpm 운전시 제안한 비선형성 보상기법에 대한 속도추정값 및 각 전류파형 (0.5 초 이후부터 보상시작)

4. 실험

제안된 제어알고리즘의 타당성을 확인하기 위해서 실험은 행해진다. 실험 동안에 저속동작에 특별히 초점이 맞춰져 있다. 하드웨어는 3상 380 V, 50 Hz, 4극, 3 kW 유도전동기와 매트릭스 컨버터 전력회로로 구성된다. 그림 4는 정격부하의 20%, 다양한 기준속도에서 제안된 센서리스 백터제어의 속도응답과 상전류응답을 보여준다. 그림 5는 정격부하의 20%에서 기준속도 30rpm의 저속도 운전영역에서 속도응답특성을 나타낸다.

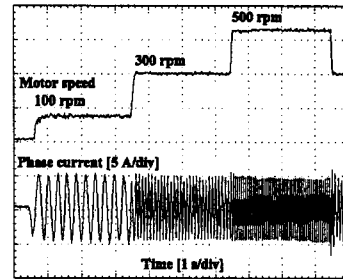


그림 4 다양한 기준속도에 따른 속도와 상전류파형 (정격 20% 부하조건)

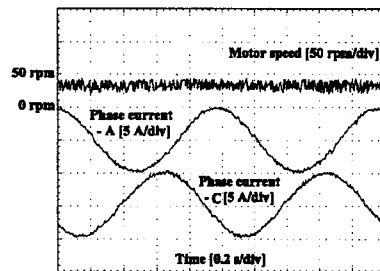


그림 5 30rpm 운전시 속도와 상전류파형 (정격 20% 부하조건)

5. 결론

본 논문에서는 전동기로 유입되는 무효전력과 일정한 공극자속을 사용한 매트릭스 컨버터 유도전동기 구동장치를 위한 새로운 간단한 센서리스 기법을 제안하였다. 제안된 센서리스 기법은 전동기 상수값의 변동에 둔감할 뿐 아니라 PQR 전력변환을 사용하는 비선형특성을 이용한 보상전략은 저속영역에서 향상된 속도제어성능을 보였다.

[참고 문헌]

- [1] M. P. Kazmierowski, R. Krishnan, and F. Blaabjerg, Control in Power Electronics - selected problems, Academic press, ISBN 0-12-402772-5, 2002, Ch. 3.
- [2] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives," *Proc. of The IEEE*, vol. 90, no. 8, pp. 1359-1394, Aug. 2002.
- [3] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "Reduced Order Extended Luenberger Observer Based Sensorless Vector Control Fed By Matrix Converter with Nonlinear Modeling," in *Proc. PEMCO4*, pp. 4.292-4.299, 2004.
- [4] K. B. Lee and F. Blaabjerg, "Performance Improvement of Sensorless Vector Control for matrix Converter Drives Using PQR Transformation," in *Proc. PESC05*, pp. 2403-2409, 2005.