

문상천^o 이승철 정승기
 광운대학교 전기공학과

Efficiency Improvement of VVCF-Induction Motor Drives
 with Counter EMF Estimation

Moon Sang-Chun^o Lee Seung-Chul Jeong Seung-Gi
 Kwangwoon University

Abstract

This paper proposes the efficiency improvement method of vvcf-induction motor drives, which operates always at rated speed, regardless of load conditions, with counter emf estimation. The counter emf is estimated by detecting the fundamental component of motor input current, which is employed in speed control algorithm through the comparison with the actual counter emf during the nonconduction interval. The input power reduction by speed control is confirmed through simulations and experimental results.

1. 서론

일반적으로 범용 유도전동기의 효율은 중소용량에서는 85% 이하이나 대용량에서는 90% 정도이므로 비교적 효율이 높은편이다. 하지만 실제 운전시 전동기의 용량은 과부하상태를 대비하여 보통 20% 정도 여유를 두고 선정되고 있으며, 운전패턴에 따라 중부하와 경부하를 오르내리는 부하변동으로 운전시간의 대부분 정격보다 낮은 경부하상태에서 운전하게 된다.

따라서 유도전동기의 효율 향상은 에너지절감 측면에서 상당히 중요하다. 유도전동기의 효율은 정격부하 근처에서 최대가 되도록 설계되어 있으므로 정격부하에 가까운 중부하 영역에서는 비교적 높은 효율을 유지하지만 경부하에서는 효율이 급격하게 떨어지는 특징이 있다. 그러므로 유도전동기의 부하조건이 변하더라도 항상 높은 효율을 유지하는 운전방식의 개발이 요구되고 있는 실정이다.

최근들어 전력전자공학의 발전과 더불어 전력용 반도체소자와 마이크로프로세서의 사용이 보편화됨에 따라 기존의 전동기에 효율을 향상시킬수 있는 제어방법에 대한 연구가 이루어져 왔다. 따라서 본 논문에서는 VVCF 제어방식을 채택, SCR로 구성되는 교류전압제어기를 사용하여 부하조건 변화에 무관하게 항상 정격속도 부근에서 운전할 수 있도록 전동기 내부에서 발생하는 역기전력 추정을 통한 속도제어를 수행함으로써 운전효율 개선방법을 제시하였다.

2 등가회로상에서의 역기전력에 대한 정의

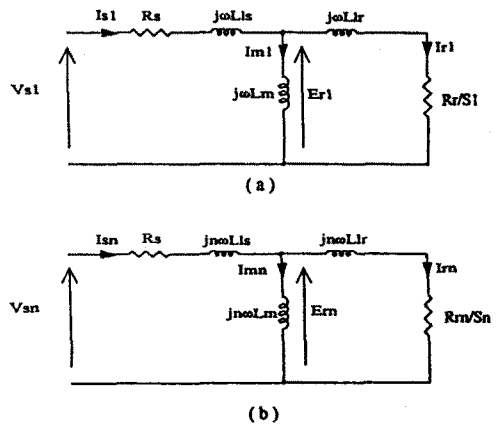


그림 1. 기본파 (a) 와 고조파 (b) 의 상당 근사등가회로

고조파 슬립을 기본파 슬립에 대해서 표현하면 다음과 같다.

$$S_n = 1 \pm [(1 - S_1) / n] \quad (1)$$

그리고 회전자속 전압의 n차 고조파 성분은

$$E_m = [(R_m / S_n) + j\omega L_m] I_m \quad (2)$$

으로 표현할 수 있으며, 식 (1)에서 기본파 슬립의 변화에 대해 고조파 슬립은 거의 변화가 없으므로 고조파성분에 대한 리액턴스 성분이 회전자 저항보다 훨씬 크기때문에 R_m / S_n 을 생략할 수가 있게 된다. 그러면 회전자속 저항의 전압강하는 회전자 전류의 고조파 성분에 대한 영향을 무시할 수 있게되므로 기본파 성분전류와의 관계로 근사화할 수 있다. 이것을 식으로 표현하면 아래의 식 (3)와 같다.

$$E_r = (R_r / S_1) I_{r1} \quad (3)$$

테브난 이론을 적용하여 식 (3)을 역기전력과 관계로 나타내면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} E_o &= \frac{L_m}{L_m + L_r} E_r \\ &= \frac{L_m}{L_m + L_r} \frac{R_r}{S_1} I_{r1} \end{aligned} \quad (4)$$

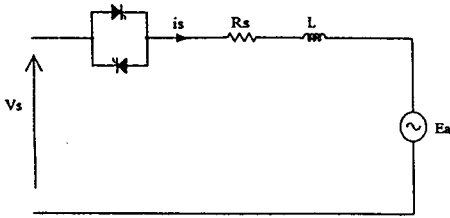


그림 2. 테브난 이론을 적용한 단순화된 등가회로

그림 (1-a)의 기본파성분 등가회로에서 고정자 전류와 회전자 전류의 관계를 살펴보면

$$I_{r1} = \{\omega L_m / [(R_r / S_1)^2 + \omega^2 (L_m + L_b)^2]^{1/2}\} I_{r1} \quad (5.a)$$

$$\lambda = \pi / 2 - \tan^{-1} [\omega (L_m + L_b) / (R_r / S_1)] \quad (5.b)$$

∴ λ : 고정자 전류와 회전자 전류의 위상차

이고, 위의 식 (5.a)을 식 (4)에 대입하여 고정자 전류의 기본파 성분과 역기전력의 관계를 정의할 수 있다.

$$E_o = F \times I_{r1} \quad (6)$$

$$\therefore F = \frac{(R_r / S_1)(\omega L_m)^2}{\omega (L_m + L_b) [(R_r / S_1)^2 + \omega^2 (L_m + L_b)^2]^{1/2}}$$

식 (6)의 관계식으로부터 역기전력은 전동기 파라미터와 슬립 그리고 고정자 전류의 기본파 성분의 함수임을 알 수 있다. 즉, 여기서 전동기 파라미터를 고정되어 있다고 가정한 상태에서 고정자 전류의 기본파 성분과 슬립에 따른 그때의 역기전력을 추정할 수가 있다.

이와는 반대로 정격속도에 해당하는 슬립을 S₁에 대입함으로써 정격속도에 해당하는 역기전력의 계산이 가능하게 된다. 그러므로 전동기의 속도제어가 가능함을 알 수 있다.

3. VVCF - 유도전동기 시스템의 등가회로

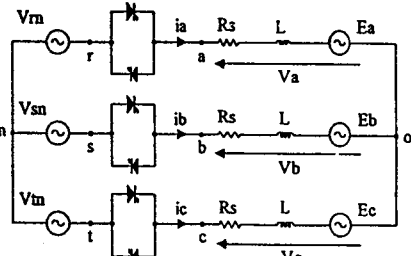


그림 3. VVCF - 유도전동기 시스템 등가회로

(1) 모드 1 : 3상이 모두 도통인 경우

$$V_o = V_m \quad (7)$$

(2) 모드 2 : a,b상 도통, c상 불통인 경우

$$V_o = 0.5(V_a - E_c) \quad (8)$$

b상이 불통인 경우에도 마찬가지로 관계식이 성립된다.

$$V_o = 0.5(V_b - E_a) \quad (9)$$

(3) 모드 3 : a상 불통, b,c상 도통인 경우

$$V_o = E_a \quad (10)$$

위의 식을 보면 알 수 있듯이 불통인 상의 단자전압은 해당상의 역기전력이 그대로 나타남을 알 수 있다.

3.1 역기전력 추정 알고리즘

전동기 역기전력은 기본파성분 전류에 비해서 고조파의 영향을 무시할 수 있으므로, 기본파성분 전류와 전동기 파라미터 그리고 슬립의 관계로 표현될 수 있음을 보였다. 따라서 전동기 파라미터가 변하지 않는다는 가정하에서 전동기의 입력전류를 검출하여 동기좌표축상의 dq 변환을 한후 여기서 역기전력과 관련된 상수를 첨가한 후 다시 역변환하면 각 상에 해당하는 역기전력을 구할 수 있다.

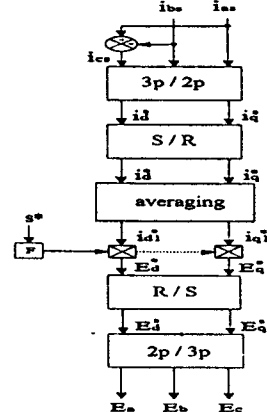


그림 4. 역기전력 추정 순서도

3.2 속도제어 알고리즘

불통구간의 임의의 시점에서 인터럽트를 발생시켜 해당 시점에서의 실제 역기전력을 전원전압과 스위치 양단전압의 차이로 인해 계산하고 전동기 입력전류에 의해 추정된 역기전력과 비교를 통해서 점오차의 증감이 이루어지며, 이로인해 기준속도를 추종하게 된다. 아울러 속도제어에 따른 운전효율 개선도 이루어질 수 있다.

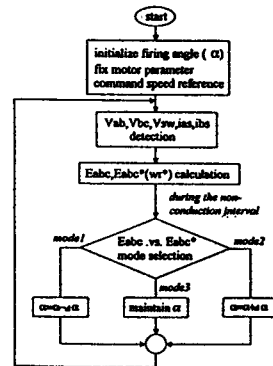


그림 5. 역기전력 추정에 의한 속도제어 알고리즘

4. 시뮬레이션 및 실험

파라미터	속정치
고정자 저항	0.22 (Ω)
회전자 저항	0.116 (Ω)
철손 저항	79.0 (Ω)
고정자 누설인덕턴스	0.9045 (mH)
회전자 누설인덕턴스	1.3568 (mH)
자화 인덕턴스	27.1359 (mH)

표 1. 시뮬레이션 및 실험조건

본 논문에서 사용된 시뮬레이션 및 실험 조건은 위의 표 1과 같으며, 파라미터들이 변하지 않는다는 가정하에서 실시하였다. 그림 6은 기준속도를 1760(rpm)으로 하고, 부하토크를 10(N.m)로 고정한 상태에서 전동기 입력전류(a)와 이 전류를 가지고 추정된 역기전력(b) 그리고 입력전압(c)을 나타내고 있다. 전류가 흐르지 않는 불통구간을 보면 추정된 역기전력과 실제 전동기 입력단에 나타난 역기전력이 일치함을 알 수 있다. 그림 7은 기준속도를 1760(rpm)으로 고정한 상태에서 부하율을 25 - 75 - 25%로 변화시켰을 때, 기준속도에 대한 실제 속도의 응답특성을 나타내고 있다. 그림에 나타난바와 같이 부하변화에도 불구하고 시뮬레이션(a)과 실험(b)의 실제속도가 기준속도를 잘 추종함을 알 수 있다. 그림 8의 실험파형 (a),(b),(c)는 20 - 25 - 40%에 해당하는 각각의 부하율에 대해서 정격속도로의 운전이 가능하도록 역기전력 추정에 의한 속도제어를 했을 때, 그에 따라 입력전력이 감소함을 보여주고 있다.

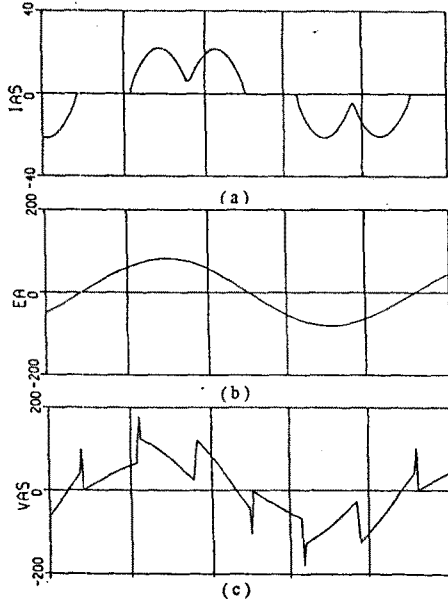


그림 6. 조건 : ① 기준속도-1760(rpm) ② 부하토크-10(N.m)
(a) 입력전류 (b) 역기전력 (c) 입력전압

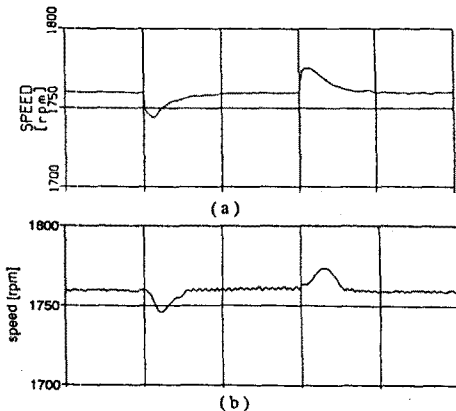


그림 7. 조건: 기준속도-1760(rpm), 부하율-① 25% ② 75% ③ 25%
(a) 실제속도(시뮬레이션) (b) 실제속도(실험)

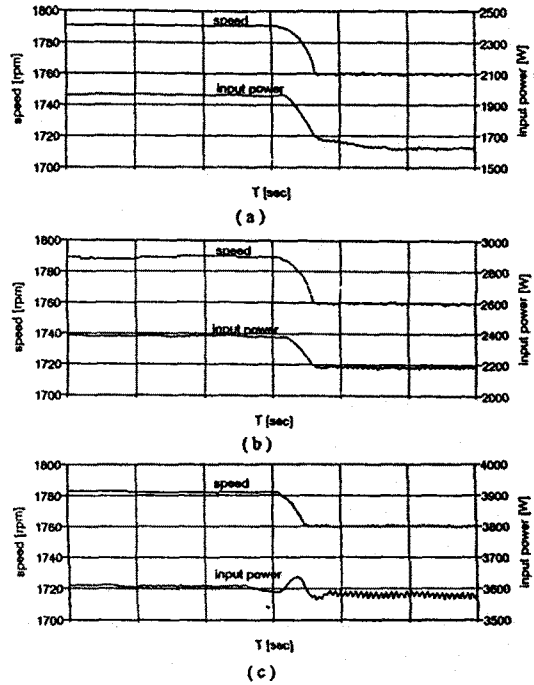


그림 8. 속도제어에 따른 입력전력의 감소
(a) 부하율 20% (b) 부하율 25% (c) 부하율 40%

5. 결론

본 논문에서는 유도전동기의 최적 효율 운전을 위한 방안으로 80C196KC 16-bit 마이크로 콘트롤러를 이용한 VVCF - 유도전동기 시스템의 디지털 제어를 통해 전동기의 역기전력을 추정하여 부하량의 변동에 관계없이 항상 최적효율 운전점에서 운전이 가능하도록 속도제어를 함으로써 운전효율을 높일 수 있는 방안을 제시하였고, 또한 속도제어를 함으로써 부하변동으로 인한 실속방지 대책이 수립되었다. 그리고 유도전동기의 운전효율과 입력전력의 추이는 회전속도에 따라 결정되는데 효율이 높은 속도일수록 입력전력도 작아지는 특성을 가지고 있다. 그러므로 실제 시스템에서는 커플링에 의한 직류발전기의 자체 손실을 무시할 수가 없기때문에 정확한 효율을 측정하기가 어렵다. 따라서 속도제어에 의한 입력전력의 감소에 의해 효율향상의 면을 입증하였다.

참 고 문 헌

1. S.A. Hamed and B. J. Chalmers, " Analysis of Variable-Voltage Thyristor Controlled Induction Motor" IEE Proceedings, Vol 137, Pt. B, No. 3, May 1990
2. T.A. Lipo, " The Analysis of Induction Motor Voltage Control by Symmetrically Triggered Thyristors", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-90, March/April 1971.
3. T.M. Rowan and T.A. Lipo " A Quantative Analysis of Induction Motor Performance Improvement by SCR Voltage Control," IEEE Trans. on ind., Vol IA-19, No. 4, pp 545-553, July/Aug 1983
4. N. Mohan, " Improvement in Efficiency of Induction Motors by means of Voltage Control," IEEE Trans. on Pow. Appar. Syst., Vol. PAS-99, No. 4, pp. 1466-1471, July/Aug 1980.