

Walsh 함수를 이용한 벡터제어용 유도전동기 정수값의 자동 설정

최현성, 설승기
서울대학교 전기공학부

Automatic Commissioning of Vector Controlled Induction Motors Using Walsh Function

Hyun-Sung Choi and Seung-Ki Sui
School of Electrical Engineering, Seoul National University

Abstract - In this paper, an algorithm of the automatic commissioning for vector controlled induction motor using controller characteristics is proposed. The automation of commissioning sequence is carried out using Walsh function analysis.

In the proposed method, the distortion of the controller output waveform is easily detected and can be automatically tuned by using Walsh function analysis. This tuning algorithm has the advantage such as less sensitivity to the variation of other parameters and high sensitivity to parameter error. Hence, the easy tuning of high performance drive system of the induction motor is possible. Some experiments are carried out to prove the validity of the proposed automatic commissioning algorithm.

1. 서 론

최근 들어 여러 가지 산업 응용 분야에서 고성능 유도전동기의 벡터 제어에 대한 요구가 증가되고 있는 추세이다. 벡터 제어를 통한 순시적인 토크 제어를 위해서는 토크분 전류와 자속분 전류와의 확실한 비간섭 제어가 요구된다[1].

두 성분을 정확하게 분리시켜 간섭을 제거하려면 제어기에서 유도전동기의 정확한 정수값들을 알아야 한다[2]. 이를 위하여 여러 가지, 정수값의 추정 방법이 제안되었는데 이는 크게 온라인 추정방법과 오프라인 추정방법으로 나눌 수 있다. 대부분의 온라인 추정방법에서 초기값의 설정은 매우 중요한데, 최소자승법과 같은 반복 연산 알고리즘을 사용하는 경우에는 초기값이 실제값과 지나치게 다를 경우 실제값 추정은 불가능하거나 연산 시간이 지나치게 길어진다. 따라서 이 경우에도 적절한 오프라인 방법으로 정수의 초기값을 설정해 주는 것이 필요하다. 이를 위하여 여러 가지 오프라인 정수추정 방법에 관한 많은 연구가 진행되었다[3,4]. 하지만 이런 기존의 방법은 전동작 영역에서 적용할 수 없거나 정수값의 오차에 대해서 민감하지 못하고 다른 정수의 변동에 영향을 받는 등의 여러 가지 단점을 가진다.

이런 문제점을 해결하기 위해서, 제어기의 특성을 이용하는 유도전동기 정수값의 초기 설정 방법이 제안되었다[5,6]. 이 방법을 사용할 경우 제어기 출력 신호의 파형을 관찰함으로써 고정자 저항값을 제외한 모든 유도전동기의 정수값들을 정확히 추정할 수 있다. 이 방법은 정수값의 오차를 파형의 왜곡 정도로부터 얻기 때문에 그 오차에 대해서 상당히 민감하고, 각각의 정수값을 추정하는 과정이 또한 독립적이기 때문에 다른 정수값들의 변화에 민감하게 반응하지 않는다. 또한 제어기의 특성을 이용하기 때문에 다른 여러 가지 전기 기기 제어시스템에 적용될 수 있다.

하지만 현장에서의 작업자가 일일이 신호의 파형을 관

찰하여 정수값을 초기화시키는 것은 상당히 많은 시간을 요구하게 되고 또한 매우 단순로운 작업이다. 예를 들어 근래의 철강 압연 라인의 경우, 실제 구동 이전에 몇 개의 추진동기와 나머지 많은 부속 전동기의 정수값을 초기화시켜야 한다. 따라서 자동으로 전동기의 정수값을 구동 전에 초기화시켜 주는 것이 필요하다. 본 논문에서는 유도전동기 정수값의 새로운 자동 설정 방법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 시스템을 제어하기 위한 제어기의 특성과 구형파 신호에 대해 주파수 분석의 성격을 갖는 Walsh 함수를 이용한다. 정수값의 오차가 없을 경우 제어기의 출력 파형 모양이 구형파가 됨을 이용하여 Walsh 급수의 계수 중 하나를 파형 왜곡의 지표로 잡아 이를 최소화시킴으로써 제어기 출력 파형의 왜곡을 제거시키고 궁극적으로 유도전동기의 정수값을 실제값으로 수렴시킨다.

2. 제어기 구조를 이용한 유도전동기 정수값의 초기 설정법[5,6]

제안된 정수값 설정 자동화 방법은 기본적인 제어기의 특성을 이용한다. 그림 1에서 변수 u_c , y 그리고 v 는 각각 제어기 출력, 플랜트 출력 그리고 플랜트 모델링 오차를 의미한다. 또한 변수 n 과 a 는 각각 시스템의 외란과 측정 오차로 정의된다.

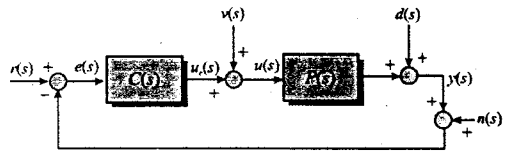


그림 1. 플랜트 모델링 오차, 잡음, 외란 성분을 포함한 기본적인 제어 블록도.

시스템 모델링의 단순화를 위하여 외부에서 인가되는 외란 $d(s)$ 를 무시하고 센서 잡음 $n(s)$ 의 영향이 충분히 작다고 가정하면 (1)과 같은 조건이 만족될 때 플랜트 출력이 기준 입력을 다르게 할 수 있다[7].

$$|C(s)P(s)| \gg 1 \quad (1)$$

이 때 제어기 출력 $u_c(s)$ 는 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} u_c(s) &= \frac{C(s)}{1 + C(s)P(s)} r(s) - \frac{C(s)P(s)}{1 + C(s)P(s)} u(s) \quad (2) \\ &\cong \frac{C(s)}{1 + C(s)P(s)} r(s) - u(s) \end{aligned}$$

(2)에서 플랜트의 모델링으로부터의 오차가 제어기의 출력 신호에 직접적으로 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 따라서 플랜트 모델링 오차를 반영하는 제어기 출력 파형을 관찰하면 정수값의 오차 정도를 명백히 파악할 수 있다. 이 방법을 사용하면 각각의 정수값의 추정을

다른 정수의 변동에 영향을 받지 않고 독립적으로 구현할 수 있다.

3. Walsh 함수를 이용한 초기 정수값 설정의 자동화

3.1 Walsh 함수

2장에서 언급한 방법을 바탕으로 정수값의 초기 설정 과정을 자동화시키기 위해서는 파형 왜곡 지표가 필요하다. 램프 형태의 속도 지령이 유도전동기 시스템에 인가되면, 제어기의 유도전동기 정수값이 실제값과 일치할 경우, 속도제어기와 q축 전류제어기 출력 파형이 모두 구형파 형태가 된다[5,6]. 따라서 구형파에 대한 Walsh 함수와 Walsh 급수를 사용한 주파수 분석을 통해서 파형의 왜곡을 파악할 수 있다.

Walsh 함수는 일련의 직교 함수의 집합(orthogonal function set)이고, 한 주기 동안 +1과 -1 두가지 값만을 갖는 구형파 형태의 함수이다[8]. Walsh 함수는 여러 가지 다른 방법으로 얻을 수 있는데 가장 쉬운 방법은 Rademacher 함수를 사용하는 방법이다. 그림 2는 이 방법을 이용해서 16차까지의 Walsh 함수를 구한 것이다.

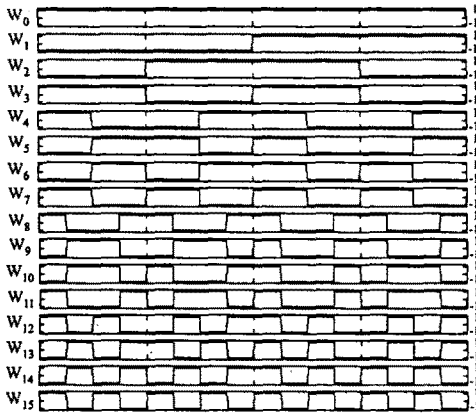


그림 2. 16차까지의 Walsh 함수 ($w_0 \sim w_{15}$).

Walsh 함수는 주기 [0,1]에서 (3)과 같이 정의되고 임의의 함수는 (4)처럼 Walsh 함수의 급수 형태로 표현 가능하다.

$$H(0, t) = \begin{cases} -1 & -\frac{1}{2} \leq t \leq \frac{1}{2} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$H(2n+p, t) = (-1)^{\lfloor n/2 \rfloor + p} \left\{ H\left(n, 2\left(t + \frac{1}{4}\right)\right) + (-1)^{n+p} \left\{ H\left(n, 2\left(t - \frac{1}{4}\right)\right) \right\} \right\}$$

$$n=0, 1, 2, 3, \dots, p = (\lfloor n/2 \rfloor \% 2) = 0 \text{ or } 1$$

$$wal(n, t) = H(2n+p, t) \quad (3)$$

여기서 $\lfloor n/2 \rfloor$ 는 $n/2$ 를 넘지 않는 가장 큰 정수값을 의미하고, $(m \% 2)$ 는 m 을 2로 나눈 나머지이다.

$$f(t) = a_0 wal(0, t) + \sum_{n=1}^{N-1} a_n wal(n, t)$$

여기서

$$a_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt, \quad a_n = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) wal(n, t) dt \quad (4)$$

(4)의 계수값들의 크기를 통해서 파형의 왜곡을 파악할 수 있다. 파형 왜곡 지표로 쓰이는 계수의 설정은 정수값의 오차가 있을 경우에 나타나는 제어기의 특성을 통하여 선택한다.

3.2 회전자 시정수 값의 자동 추정

유도전동기의 간접벡터제어시, 제어기의 회전자 시정수에 오차가 존재할 경우 슬립 주파수의 오차를 유발하게 되고 결과적으로 정확한 자속 기준제어가 불가능하게 된다. 이러한 자속각의 오차에 의한 시스템의 불확실성이 제어기에 반영되게 되어, 외란 토크가 발생하게 된다. 그림 3에서, 속도제어기가 정상적인 제어를 수행할 경우 실제 속도는 지령치를 따라가게 되고 실제 플랜트의 입력은 그림 4(b)와 같은 구형파 형태가 된다. 따라서 시스템의 모델링 오차에 의한 외란 토크가 존재한다면 실제 플랜트의 입력을 고정된 모양으로 유지하려면 제어기 출력에 왜곡이 발생하게 된다.

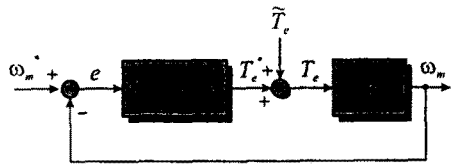


그림 3. 페루프 속도제어기의 블록도.

제어기의 회전자 시정수가 실제보다 작을 경우의 제어기 출력은 그림 4(c)와 같이 왜곡되고, 반대로 클 경우의 제어기 출력 파형은 그림 4(d)와 같이 왜곡된다.

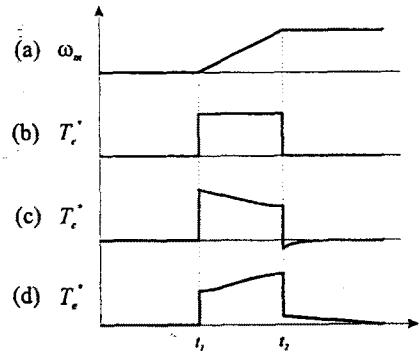


그림 4. 제어기의 회전자 시정수의 값에 따른 속도제어기 특성.

- (a) 실제 전동기 속도 (b) 속도제어기 출력 파형(동조된 경우)
- (c) 속도제어기 출력 파형(제어기에서 작게 아는 경우)
- (d) 속도제어기 출력 파형(제어기에서 크게 아는 경우).

이러한 제어기의 특성을 바탕으로 회전자 시정수값의 설정을 자동화하려면 파형의 왜곡을 정의할 수 있는 적절한 지표의 설정이 매우 중요하다. 제어기에서 회전자 시정수 값을 실제값보다 작게 알고 있을 경우 Walsh 급수의 계수, a_1 은 음이 되고, 제어기의 설정값과 실제값과의 차이가 커지면 a_1 의 절대값은 증가한다. 반대의 경우에는 a_1 은 양이 되고 오차가 증가할수록 역시 a_1 의 절대값도 증가한다. 하지만 a_1 이 음일 경우에 a_1 의 절대값은 작아진다. 이러한 a_1 크기와의 오차에 대한 변화를 보정하기 위하여 파형 왜곡 지표는 계수 a_2 에 의해 정규화된 a_1 값을 지표로 사용한다. 시뮬레이션을 통해 살펴보면, 이 값은 그림 5에서처럼 오차와 거의 선형적임을 확인할 수 있다.

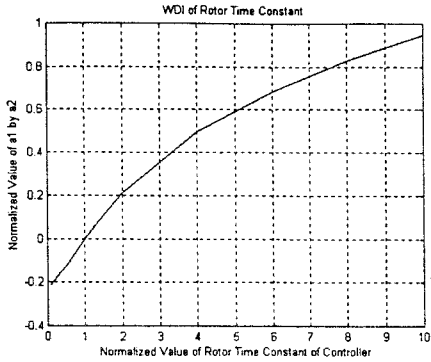


그림 5. 회전자 시정수 값의 자동 설정을 위한 파형 왜곡 지표.

회전자 시정수의 자동 설정은 그림 6과 같이 이루어지고 5~6회의 반복과정을 통해서 제어기의 회전자 시정수값을 실제값과 일치하도록 갱신할 수 있다.

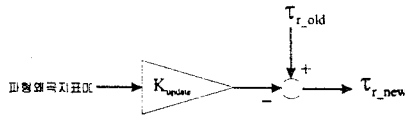


그림 6. 회전자 시정수 (τ_r) 자동 설정 블록도.

3.3 인덕턴스 값의 자동 추정

그림 7은 동기좌표계 상에서의 q축 전류제어기의 블록도이다. 만일 q축 역기전력 성분에 오차가 생기면 이는 제어기의 외란으로 작용하고, 이는 회전자 시정수값의 오차에 의한 시스템의 불확실성과 같은 역할을 한다. 따라서 이 경우에도 제어기의 출력 파형은 왜곡된다.

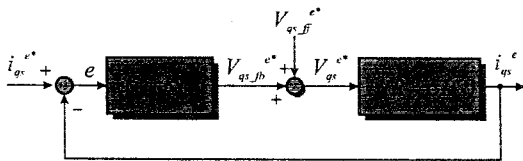


그림 7. 동기좌표계 상에서의 q축 전류제어기의 블록도.

q축 역기전력 성분의 오차는 (5)와 같다.

$$\begin{aligned}
 V_{qs,ff}^{*} &= \omega_e \widehat{L}_s i_{ds}^e - \omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e \\
 &= \omega_e L_s^* i_{ds}^e + \omega_e \Delta L_s i_{ds}^e - \omega_{sl} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^e \\
 V_{qs,ff}^{*} &\cong \omega_e \sigma \widehat{L}_s i_{ds}^e + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^{*} \\
 &= \omega_e \sigma L_s^* i_{ds}^e + \omega_e \Delta \sigma L_s i_{ds}^e + \omega_e \frac{L_m}{L_r} \lambda_{dr}^{*}
 \end{aligned} \quad (5)$$

(5)에서 알 수 있듯이 인덕턴스값의 오차가 역기전력 성분의 오차에 직접적으로 반영되고, 이는 시스템의 불확실성으로 작용하여 제어기 출력을 왜곡시킨다. 그리고 이 오차는 (5)에서 알 수 있듯이 속도에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 따라서 Walsh 급수 a_1 을 파형 왜곡 지표로 선정하여 인덕턴스 값을 보정할 수 있다. 인덕턴스 값의 자동 설정은 그림 8과 같이 이루어지고 5~6회의 반복과정을 통해서 제어기의 인덕턴스 값을 실제값과 일

치하도록 갱신할 수 있다

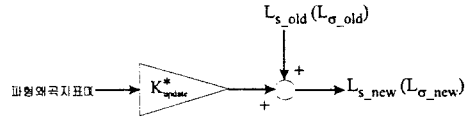


그림 8. 인덕턴스 값의 자동 설정 블록도.

4. 실험 결과

제안된 알고리즘의 유용성을 증명하기 위하여 50마력-농형 유도전동기를 이용하여 실험을 행하였다. 유도전동기의 벡터제어와 Walsh함수의 구현 및 분석을 위해서 고속 연산이 가능한 TMS320C31을 주제어기로 사용하였다. 모든 실험동안 속도 지령치는 200r/min에서 1000r/min으로 램프 형태로 증가시키면서 실험하였다.

그림 9와 10은 각각 회전자 시정수의 설정값이 실제값보다 작거나 크게 설정한 경우에 회전자 시정수 값을 자동으로 추정하는 과정을 나타낸다. 그림의 숫자는 자동으로 시정수값을 추정해나가는 순서를 나타낸다. 두 가지 경우에서 모두 제어기 출력 파형의 모양이 구형파 형태로 수렴해 나간다는 것을 확인할 수 있다.

그림 11과 12는 각각 고정자 인덕턴스의 설정값이 실제값보다 50% 작거나 크게 설정한 경우에 고정자 인덕턴스의 값을 자동으로 추정하는 과정을 나타낸다. 제어기 출력 파형의 모양을 관찰해보면 다섯번째 파형이 첫번째나 두번째 파형과 비교했을 때 구형파 형태임을 알 수 있다.

그림 13과 14는 각각 고정자 과도 인덕턴스의 값을 실제값보다 50% 작거나 크게 설정한 경우에 고정자 과도 인덕턴스의 값을 자동으로 추정하는 과정을 나타낸다. 제어기 출력 파형의 모양을 관찰해보면 다섯번째 파형이 첫번째나 두번째 파형과 비교했을 때 보다 구형파 형태임을 알 수 있다.

회전자 시정수 값은 $\pm 20\%$ 까지의 추정이 가능하였고 인덕턴스 값은 $\pm 5\%$ 까지의 추정이 가능하였다. 따라서 제안된 알고리즘으로 유도전동기 정수값의 초기화가 이루어질 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 논문에서 유도 전동기 벡터제어를 위한 초기 정수값의 자동 설정에 관한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 인가된 제어기의 특성을 통해서 정수값의 오차를 판단하고 Walsh함수를 통해서 이를 자동으로 제거할 수 있다는 것을 실험을 통하여 확인하였다. 제안된 방법은 제어기의 기본적인 특징만을 이용하기 때문에 다른 여러 가지 전기 기기 시스템에 확장하여 적용시킬 수 있다는 장점을 갖는다.

[참 고 문 헌]

- [1] P. Vas, *Vector Control of AC Machines*, Oxford University Press, pp.122-215, 1990.
- [2] R. Krishnan and F. C. Doran, Study of Parameter Sensitivity in High Performance Inverter Fed Induction Motor Drive System, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. IA-23, no.4, July/Aug., pp.623-635, 1987.
- [3] C. Wang, D. W. Novotny and T. A. Lipo, An Automated Rotor Time Constant Measurement System for Indirect Field Oriented Drives, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-21, May/June, pp. 624-632, 1985.

- [4] R. D. Lorenz, Tuning of Field-Oriented Induction Motor Controllers for High Performance Applications, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-22, no. 2, March/April, pp. 293-297, 1986.
- [5] 석출기, 가상 회전자 자속기준 제어를 이용한 심구형 유도전동기의 고성능 운전, 공학박사 학위논문, pp.89-98, 1998
- [6] J. K. Seok and S. K. Sul, Induction Machine Parameter Tuning for High Performance Drives, *IEEE-IAS Conf. Rec.*, pp.633-639, 1998.
- [7] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, Addison-Wesley Publishing Company, pp.15-75, 1988.
- [8] K. G. Beauchamp, *Walsh functions and their applications*, New York : Academic, pp.5-68, 1975

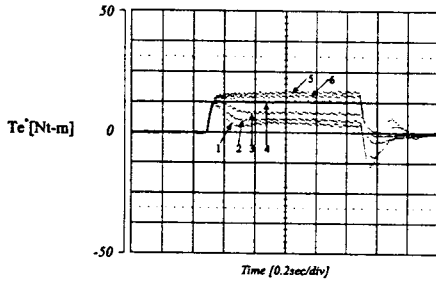


그림 9. 회전자 시정수 값을 잘못 알고 있는 경우의 자동 추정 과정. ($\tau_r^* = \frac{1}{5} \tau_r^0$)

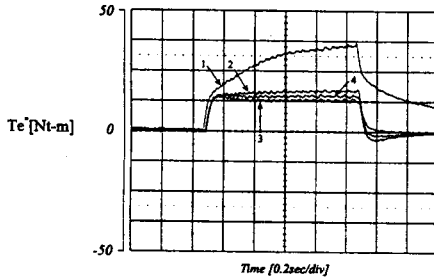


그림 10. 회전자 시정수 값을 잘못 알고 있는 경우의 자동 추정 과정. ($\tau_r^* = 5\tau_r^0$)

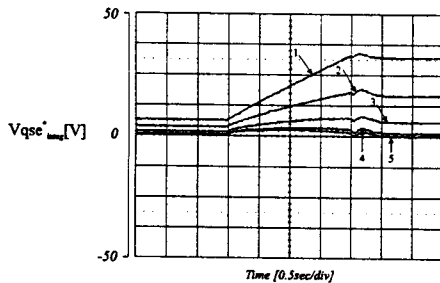


그림 11. 고정자 인덕턴스 값을 잘못 알고 있는 경우의 자동 추정 과정. ($L_s^* = 0.5L_s^0$)

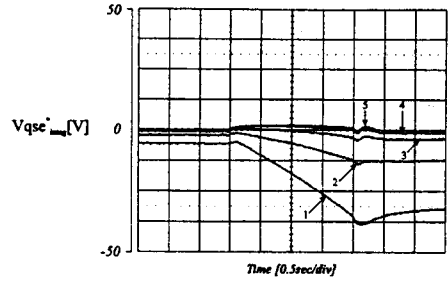


그림 12. 고정자 인덕턴스 값을 잘못 알고 있는 경우의 자동 추정 과정. ($L_s^* = 1.5L_s^0$)

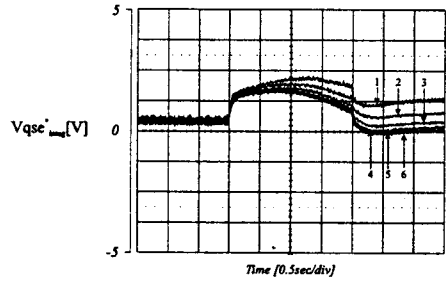


그림 13. 고정자 과도 인덕턴스 값을 잘못 알고 있는 경우의 자동 추정 과정. ($L_s^* = 0.5L_s^0$)

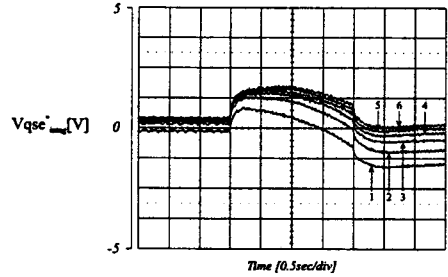


그림 14. 고정자 과도 인덕턴스 값을 잘못 알고 있는 경우의 자동 추정 과정. ($L_s^* = 1.5L_s^0$)

표 1. 유도전동기와 인버터 사양

유도전동기	
정격 전력	37(kW)
정격 선간 전압	170(V)
극수	4
정격 속도	1780(r/min)
정격 토크	200(Nm)
고정자 저항(R_s)	0.032(Ω)
회전자 저항(R_r)	0.022(Ω)
상호 인덕턴스(L_m)	5.23(mH)
고정자 인덕턴스(L_s)	5.48(mH)
회전자 인덕턴스(L_r)	5.48(mH)
관성 모멘트(J_m)	0.2($\text{kg} \cdot \text{m}^2$)
인버터와 제어기	
스위칭 소자,	IGBT, 5(kHz)
스위칭 주파수	
CPU	TMS320C31