

하이브리드 제어를 사용한 유도전동기 벡터제어

柳景綸, 李弘熙

Vector Control of Induction Motor Using Hybrid Controller

Kyung-Yoon Rhyu, Hong-Hee Lee

요약

벡터제어기법은 유도전동기의 고성능 운전을 위해 널리 사용되고 있다. 벡터제어기법을 사용해 전동기의 속도제어를 행할 경우 전동기의 속도나 전류를 제어하기 위해 주로 PI제어기가 사용되고 있다. 이 경우 유도전동기의 동특성은 PI제어기의 이득과 밀접한 관계를 갖고 있으며 유도전동기의 고성능제어를 위해서는 PI제어기의 이득을 최적화 시킬 필요가 있다. 그러나 PI제어기의 이득을 최적화 시키기 위해서는 전동기제어 시스템의 등가모델을 정확히 알아야 하기 때문에 변동 부하조건하에서 일관성 있는 최적 이득값을 얻기란 대단히 힘들다. 본 논문에서는 이러한 PI제어기의 단점을 보완하기 위해 과도상태만을 제어하기 위한 간략화된 퍼지제어기와 정상상태 제어를 위한 기존의 PI제어기를 병렬로 구성한 하이브리드 제어를 제안하고 이를 실제 유도전동기의 벡터제어에 적용하여 알고리즘의 타당성을 검증하였다.

ABSTRACT

The vector control scheme is usually applied to the high performance induction motor drives. The PI controller is adopted traditionally to control the motor speed and currents in the vector control scheme. In this case, the dynamic performance of the induction motor is dependent on the PI gains and the gain optimization is necessary in order to get a good dynamic performance. But, it is very hard to optimize the PI gains uniquely within the speed control range because the equivalent model of the motor control system should be known exactly. In this paper, we propose the hybrid control scheme to remove the defects of PI controller. The hybrid control scheme includes the simplified fuzzy controller which operates in the transient state and the PI controller which operates in the steady state. The proposed scheme is applied to the vector control for induction motor, and the digital simulation and the experimental results are given to verify the proposed scheme.

Key Words : Vector control, PI controller, Fuzzy controller, Dynamic performance, Hybrid controller

1. 서론

유도전동기의 고성능 제어를 위해 벡터제어기법이 널리 사용되고 있다. 벡터제어는 유도전동기의 입력전류를 토크분 전류성분과 자속분 전류성분으로 분리해 이를 독립적으로 제어하여 유도전동기가 타여자 직류전동기와 유사한 속도 및 토크 응답특성을 갖도록 제어하는 기법이다.^[1] 벡터제어기법을 이용해 유도전동기의 속도제어를 행할 경우 다소의 차이는 있지만 일반

적으로 그림 1과 같은 제어기법을 사용하고 있다. 그림 1에서와 같이 벡터제어기는 내부적으로 구현이 용이한 PI제어기들로 구성되어 있으며 구체적으로 속도 PI제어기, 토크분 전류 PI제어기 및 자속분 전류 PI제어기 등이 있다. 벡터제어기법을 사용해 보다 우수한 유도전동기의 동특성을 얻기 위해서는 이러한 각 제어기의 PI이득이 최적화 되어야 한다. 그러나 이들 이득값들을 얻기 위해서는 부하특성이나 전동기 모델 등이 포함된 전동기제어 시스템 전반에 관한 등가모델을 정

PI제어기의 구성에 대한 이론은 잘 알려져 있기 때문에 설명을 생략하고 과도상태를 담당하는 퍼지제어기의 설계에 관해서만 언급하기로 한다. 그림 2에서 입력과 출력에 대한 오차 및 오차의 미분치를 퍼지변수로 사용하여 퍼지제어규칙을 만들었다. 퍼지 변수는 오차 e 와 오차의 미분치 Δe 는 식 (1), (2)와 같이 정의되어 진다.

$$e(n) = r(n) - y(n) \tag{1}$$

$$\Delta e(n) = e(n) - e(n-1) \tag{2}$$

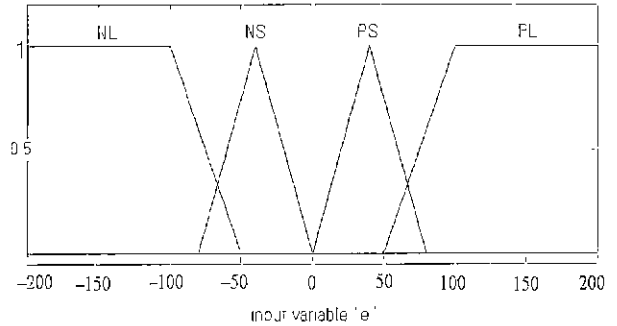
기존의 퍼지제어기에 의한 속도나 전류제어기에서는 퍼지입력변수 $e(n)$ 및 $\Delta e(n)$ 가 일반적으로 7개의 소속함수를 가지고 있다. 이 경우 퍼지규칙은 49로 복잡해지며, 이로 인한 비퍼지화 과정 역시 많은 연산과정을 요하게 된다. 또한 입력 변수의 소속함수가 7개 일 경우 출력변수 역시 최소 7개 이상의 소속함수를 가져야 하며, 특히 정상 상태에서는 소속함수의 미세한 변화에도 동작 특성이 민감하게 변화하므로 보다 세분화된 출력 소속함수를 필요로 한다.

그러나 본 논문에서는 퍼지제어기가 시스템의 과도상태만을 제어하므로 소속함수의 수가 많이 줄고 그 결과 퍼지규칙의 수 역시 현격히 줄어들어 비퍼지화 과정에서 발생하는 연산지연 문제를 충분히 해결할 수 있다. 본 논문에서는 입력변수에 대한 소속함수는 각각 4개로 구성되어 있으며 이 경우 퍼지규칙은 최대 16개를 초과하지 않는다. 그림 3은 속도제어기의 경우 입력변수에 대한 소속함수를 나타내고 있으며 사용된 퍼지규칙은 표 2와 같다. 이 과정에서 사용된 추론법은 Mamdani가 제안한 최소(Minimum)연산과 퍼지 합성규칙이며 비퍼지화 방법으로는 무게 중심법(Center of area method)을 사용하였다.^[9] 전류제어를 위한 퍼지제어기의 설계법도 속도제어기의 경우와 마찬가지로 요령이기 때문에 더 이상 언급하지 않는다.

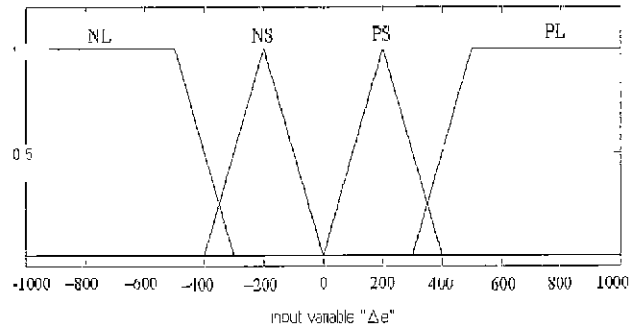
본 논문에서 제안한 하이브리드 제어기는 기존의 PI 제어기나 퍼지제어기만으로 구성한 경우에 비해 다음과 같은 장점을 가진다.

- ① 일반적으로 과도상태 및 정상상태 동작을 모두 만족시킬 수 있는 PI제어기의 최적이득을 구하기가 어렵다. 그러나 하이브리드 제어기내의 PI제어기는 정상상태 동작만을 수행하기 때문에 정상상태 동작을 최적화할 수 있는 제어기 이득을 구할 수 있다.
- ② 퍼지제어기만으로 전체 제어를 정밀하게 수행하려면 많은 입력변수로 인해 복잡한 퍼지화 규칙이 필요하게 되고 이로 인한 연산량의 증가로 제어주파수가 저하된다. 하지만 하이브리드 제어기내의 퍼지제어기는 전동기의 과도상태 제어만을 수행함으로 입력변수의 수를 획기적으로 줄일 수 있어 연산량의 증가가 초래하지

않으므로 제어주파수를 저하시키는 일을 막을 수 있다. 또한 퍼지 소속함수의 최적화를 통해 최적의 과도상태 응답을 얻을 수 있다.



(a)



(b)

그림 3 소속함수 (a)속도오차 (b)가속도 오차 Δe
Fig. 3 Membership function (a) speed error e (b) speed acceleration error Δe

표 2 퍼지제어기의 제어규칙
Table 2 Rule Table for fuzzy controller

$\Delta e \backslash e$	e	NL	NS	PS	PL
NL		-	-	-	PS
NS		NL	NS	PL	PL
PS		NL	NL	PS	PL
PL		NS	-	-	-

3. 하이브리드 제어기의 시뮬레이션

본 논문에서는 제안한 하이브리드 제어기의 특성을 알아보기 위해 Matlab을 사용해 디지털 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 사용된 유도전동기 제어 시스템은 그림 1과 동일하며 이를 바탕으로 Matlab을 사용한 속도제어 시스템 시뮬레이션 블록도는 그림 4와 같다. 효과적인 시뮬레이션을 위해 전류제어기의

특정 알고리즘으로 고정시키고 속도제어기의 특성만을 가변시키면서 시뮬레이션을 행했다.

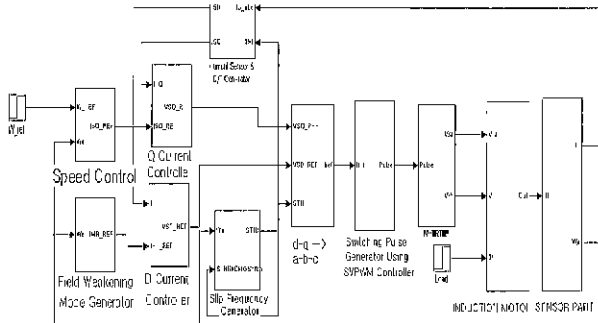


그림 4 유도전동기 벡터제어 시뮬레이션 블록도
Fig. 4 Simulation block diagram for vector controlled induction motor

그림 4에서 속도제어기의 PI 이득을 표 3과 같이 가변시키면서 단위계단형의 속도지령치를 인가했을 때의 시간응답 특성을 그림 5에 나타내었다.

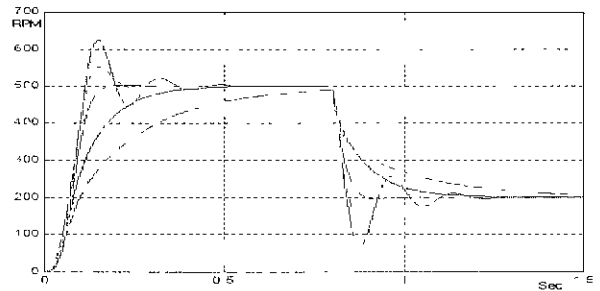
표 3 속도 PI제어기에 적용된 이득
Table 3 PI gains for speed controller

	K_P	K_I
①	1.2	12
②	0.6	12
③	0.2	15
④	0.4	13
⑤	0.7	3

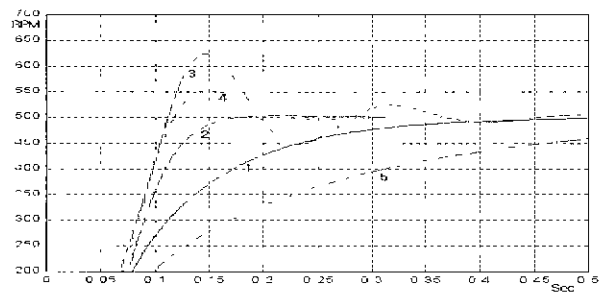
그림 5에서 (a)는 속도지령치를 500rpm으로 인가 한 후 다시 200rpm으로 가변시킨 경우의 속도응답특성이고 (b), (c)는 (a)에서 가속 및 감속의 경우를 보다 자세히 관찰하기 위해 확대해 본 그림이다.

그림 6은 하이브리드 제어기를 사용한 경우로 정상상태를 감당하는 PI제어기의 이득은 하이브리드 제어기와 PI제어기의 차이를 정확히 검증하기 위해 표 3과 같은 제어 이득을 사용하였으며 그림 6의 (a), (b), (c)는 그림 5의 그것과 각각 대응된다. 그림 5에서 제시한 바와 같이 기존의 PI제어기는 이득변화에 따라 과도상태와 정상상태 동작이 확연히 구분되는 응답특성을 보이고 있다. 그러나 하이브리드 제어기는 PI제어기에 비해 응답특성이 빠를 뿐만 아니라 이득변화에 대해서도 강인한 특성을 가지는 등 기존의 PI제어기에 비해 월등히 우수한 동작 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

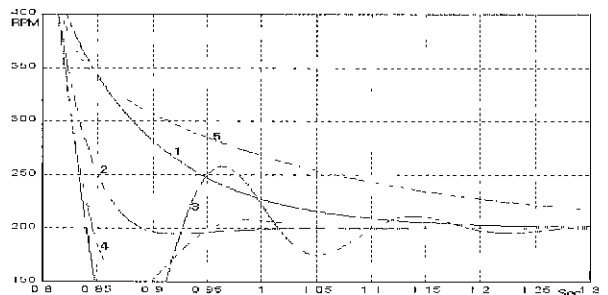
4. 실험결과



(a)



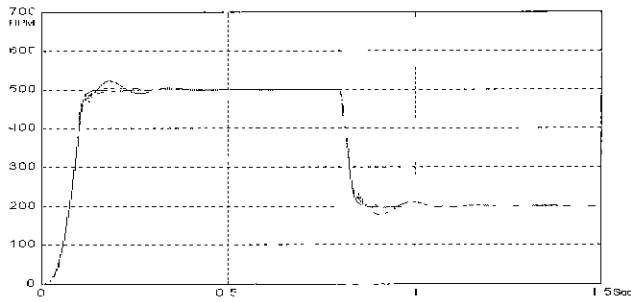
(b)



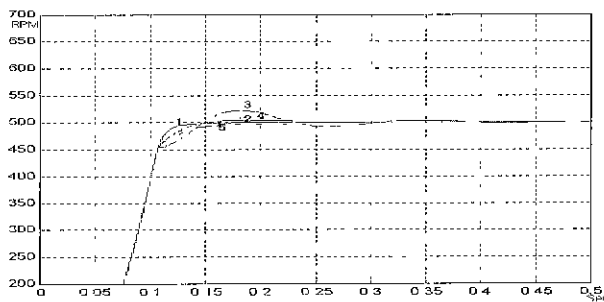
(c)

그림 5 PI제어기의 이득 변화에 따른 속도응답특성
Fig 5 Speed responses for various PI gains

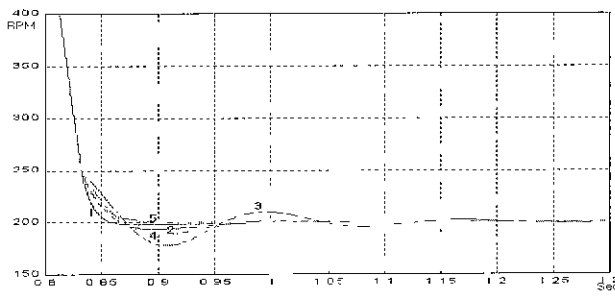
본 논문에서 제안한 하이브리드 제어기를 실제 유도전동기 벡터제어 시스템에 적용하여 기존의 PI제어기를 사용하고 있는 벡터제어 시스템과의 속도응답특성 차이를 실험적으로 비교해 보인다. PI제어기로 구성된 유도전동기의 벡터제어 시스템 블록도는 그림 1과 같다. 그림 7은 표 4와 같은 3가지 PI이득에 대해 속도 지령치를 500rpm, 800rpm로 변화시킬 경우의 속도응답을 보인 것이고 그림 8은 정역운전의 경우를 보인 것이다.



(a)



(b)



(c)

그림 6 하이브리드 제어기의 속도응답특성
Fig 6 Speed responses for hybrid controller

표 4 실험에 사용된 PI제어 이득
Table 4 PI gains used in experiment

그래프	K_P	K_I
A	속도 지령치	
B	0.9	10
C	0.1	5.0
D	0.7	2.0

또한 하이브리드 제어기를 이용한 유도전동기의 벡터 제어 시스템 블록도는 그림 9와 같으며 이를 이용한 벡터제어 속도응답특성은 그림 10 및 11과 같고 이 경우 하이브리드 제어기 내의 PI제어기 이득은 표 4와

같다.

실험에서 알 수 있는 바와 같이 본 논문에서 제안한 하이브리드 제어기는 전통적인 PI제어기에 비해 동특성이 대단히 우수함을 알 수 있었다.

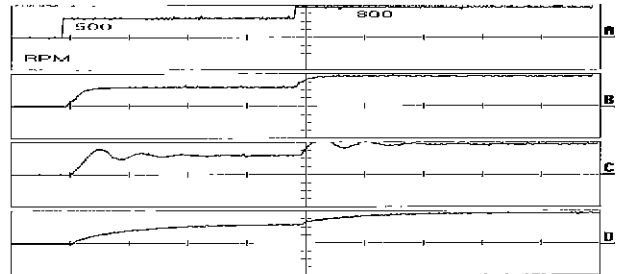


그림 7 PI제어기를 사용한 이득별 속도응답특성
Fig. 7 Speed responses for various PI gains with PI controller

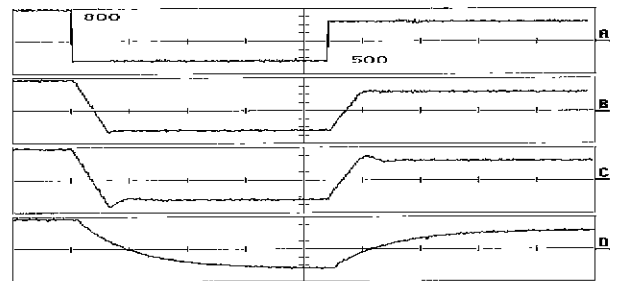


그림 8 PI제어기에 의한 정역운전 응답특성
Fig. 8 Forward/Reverse responses for various gains with PI controller

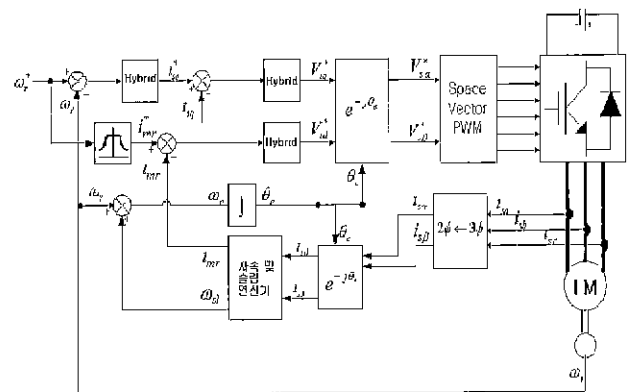


그림 9 하이브리드 제어기를 사용한 유도전동기 벡터제어 블록도
Fig. 9 Block diagram of vector controller with hybrid controller

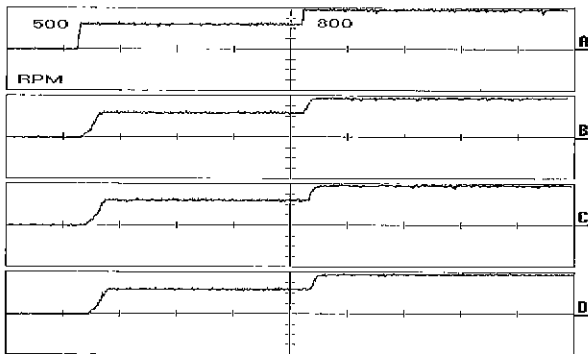


그림 10 하이브리드 제어기의 속도응답특성
Fig. 10 Speed responses for hybrid controller

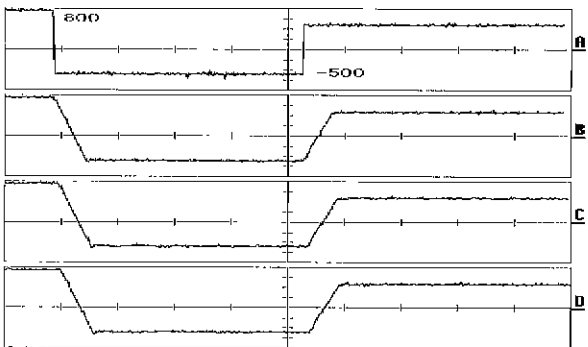


그림 11 하이브리드 제어기의 정역운전 속도응답특성
Fig. 11 Forward/reverse responses for hybrid controller

5. 결 론

기존의 PI제어기는 이득의 변화에 따라 동특성이 많은 영향을 받음과 동시에 최적화된 이득을 구하는데 많은 어려움을 갖고 있다. 본 논문에서는 기존의 퍼지제어기가 갖는 알고리즘의 복잡성과 정상상태에서의 불완전함을 해결하기 위해 과도상태만을 감당하도록 설계된 간략화된 퍼지제어기와 정상상태를 감당하는 PI제어기를 혼합하여 사용하는 하이브리드 제어기를 제안했다. 간략화된 퍼지제어기의 제어알고리즘이 대단히 간단하여 연산시간에 따른 문제점을 해결하였고 과도 상태에 대한 응답특성도 우수함을 알 수 있었다. 또한 하이브리드 제어기에서 PI제어기의 이득변화가 과제동시에서 부족제동까지 걸쳐 있어도 속도응답특성에는 크게 영향을 미치지 않아 PI이득의 변화에 따른 시스템의 불완전성을 상당히 해소 할 수 있을 것으로 판단된다. 제안된 하이브리드 제어기를 유도전동기 백터제어 시스템에 적용하여 디지털 시뮬레이션과 실험을 통해 기존의 PI제어기의 단점을 훌륭히 보완하고 있음을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] D W Novotny and T. A. Lipo, Vector Control and Dynamics of AC Drives, Clarendon Press, 1996
- [2] J. Bu and L. Xu, "A High Performance Full Fuzzy Controller for Induction Machine Drives", Proc. of IAS'98, 1998
- [3] T. Fukuda and T. Shibata, "Theory and Applications of Neural Networks for Industrial Control Systems", IEEE Trans on Industrial Electronics, Vol.39, No.6, Dec. 1992
- [4] D W Mir, D. S. Zinger, "Fuzzy Controller for Inverter fed induction machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol.30, No.1, 1994
- [5] A Rubaai, D.Ricketts and MD Kankam, "Experimental Verification of a Hybrid Fuzzy Controller for a High Performance BLDC", Proc. of IAS'99, 1999.
- [6] Wei Li, "Design of a Hybrid Fuzzy Logic Proportional Plus Conventional Integral-Derivative Controller", IEEE Trans. on Fuzzy Systems, Vol.6, Nov.1998
- [7] K.L.Shu, T.F. Chan, and Y.K. Wong, "Hybrid Fuzzy Two-stage Controller for an Induction Motor", Proc. of IAS'98, 1998
- [8] B. C. Kuo, Automatic Control System, Prentice Hall
- [9] K. M. Passino and S. Yurkovich, Fuzzy control, Addison-Wesley, 1998

본 연구는 "정보통신 우수시범학교 지원사업단"의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

< 저 자 소 개 >



류 경 운(柳景繪)

1973년 5월 24일생. 1995년 울산대 제어계측공학과 졸업. 2000년 울산대 대학원 석사과정 졸업. 현재 대우통신 부산연구소 근무.



이 홍 희(李弘熙)

1957년 10월 15일생. 1980년 서울대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1982년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사) 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사) 1994~1995년 Texas A&M 방문교수. 현재 울산대학교 전기전자 및 자동화공학부 교수.