

태양전지 최대전력점 추종제어를 위한 퍼지 제어기의 FPGA구현

김형진, 천경민, 이우희, 이준하, 이흥주
 상명대학교 컴퓨터시스템공학과, 정보디스플레이 연구소

FPGA Implementation of Fuzzy Logic Controller for Maximum Power Point Tracking in Solar Power System

Hyung-Jin Kim, Kyung-Min Chun, Woo-Hee Lee, Jun-Ha Lee, Hoong-Joo Lee
 Dept. of Computer System Engineering, Information Display Research Center, SangMyung University

Abstract - 태양전지는 일사량에 따라 그 출력특성이 변화하기 때문에 태양전지로 부터 최대출력을 얻기 위해서는 컨버터에 의한 최대 전력점 추종 제어가 필요하다. 본 연구에서는 태양광 발전시스템의 최대전력추종을 위해 퍼지 이론을 도입한 퍼지제어기를 설계하였다. 그리고 퍼지제어기의 디지털 설계를 위해 태양광 발전시스템의 각 부분을 구성하고, 마이크로프로세서와 FPGA의 두가지 방식으로 제어기를 구현하였다. 또한 구현된 두 가지 방식의 퍼지제어기에 대해 실험을 통하여 비교분석 하였다

1. 서 론

태양전지는 일사량, 동작전압 및 온도에 의해 그 출력특성이 변화한다. 일사량에 따른 태양전지 출력의 경우, 각 일사량에서의 최적 동작점인 출력 전력의 최대점을 각각 가지고 있는데, 이 점이 각 일사량 값에서 태양전지 에너지 효율이 가장 높은 곳이라 할 수 있다. 따라서 외부환경의 변화에도 항상 최대 출력점에서 동작하기 위한 제어가 필요하다[1].

기존의 제어기법으로 태양광 발전과 같이 비선형 시스템을 제어하기 위해서는 보다 정확한 모델링이 필수조건이다. 하지만 복잡한 시스템은 모델링 하기가 어렵고 설사 구현하더라도 이에 적절한 제어를 설계하기가 쉽지 않다. 이와 같은 이유로 태양광 발전시스템의 발전효율을 높이기 위한 최대 전력점 추종제어를 위해서는 운전자의 경험에 의한 제어가 기존의 제어기를 통한 제어보다 효과적일 수 있다.

퍼지제어기들은 운전자의 경험과 노하우에 기초한 지능형 제어의 선두기술로써, 산업현장에서 종종 사용되어 그 효과가 입증된 바 있다. 퍼지제어기의 구성은 현실적인 수치값 또는 언어적 정보를 퍼지값으로 변환하는 퍼지화, 퍼지규칙 정보를 가지고 있는 퍼지규칙기반, 입력된 퍼지값과 해당되는 퍼지규칙들로부터 추론결과를 도출하는 퍼지추론엔진 및 추론된 퍼지집합을 수치값으로 변환하는 비퍼지화로 구성된다. 퍼지제어는 비선형 고차 미분방정식을 풀지 않고도 제어시스템의 제어알고리즘을 만들 수 있다. 또한 퍼지제어는 허용오차 범위 안에서 하드웨어의 도움으로 고속의 결과를 얻을 수 있고, 하드웨어가 비교적 저가로 구성할 수 있으며 서로 다른 제어 대상에 대해 쉽게 같은 구조의 제어기를 사용할 수 있는 장점이 있다[2].

따라서 본 논문에서는 태양광발전시스템의 최대전력추종을 위한 컨버터 제어에 퍼지제어 기법을 적용한 디지털 퍼지제어기를 구현하였다. FPGA와 마이크로프로세서 두가지 방식을 고려하여 설계하고, 구현된 제어기를 비교 실험하여 디지털 퍼지제어기의 하드웨어 구현방법에 대한 방향을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 태양광발전부

태양광 발전부는 50W로 25W급 1개와 12W급 2개의 태양전지를 병렬 연결하여 총 3개의 모듈로 구성된다. 일사량 변동에 따른 실험변수를 주기 위해 3개의 태양전지간의 on/off 스위치를 설치하였고, 이 스위치를 조절하여 일사량의 급격한 변화에 대한 태양전지의 출력을 얻어내었다. 두 개의 태양전지가 동일한 전기적인 특성을 갖고 같은 일사강도를 갖는 경우, 병렬로 연결된 태양전지의 출력특성은 일정전압의 크기에 전류만 2배로 증가된 형태를 갖는다. 즉, 개방전압은 변하지 않고 단락전류만 2배로 증가된 특성을 갖는다[3].

2.2 전력변환부

전력변환부는 승압형컨버터, 입력센싱부, 신호증폭, 게이트구동회로가 포함된다. 태양전지의 출력전압범위는 0~20.8V인데 반해 디지털 제어기의 A/D변환부는 0~5V 범위로 제한되기 때문에 전압레벨의 변환과정이 필요하다. 수kW급의 대용량의 경우에는 홀 효과를 사용한 전압, 전류센서를 이용하지만, 본 연구에서는 소용량인 점을 감안하여 전압분배 회로를 통하여 간단히 해결하였다. 디지털 제어기의 PWM 신호레벨은 최대 5V정도이고, 고주파수 대역일수록 신호감쇄가 더 크게 발생한다. 또한 사용되는 스위치의 전압레벨이 동시 시 최소 10V이상이기 때문에 디지털 제어기의 출력을 보강하고 증폭하는 회로가 추가적으로 요구된다. 본 연구에서는 신호를 증폭하는 방법으로 OP-amp를 활용하였다. 게이트구동회로의 입력전압은 6.6V(Vcc=11V)이상에서 logic '0', 3.8V(Vcc=11V)이하에서 logic '1'의 전압을 출력한다. logic '1'의 전압은 12V정도이며, 이는 컨버터에 사용된 MOSFET 스위치를 안정적으로 동작시키기 위해 충분한 전압이다. 본 실험에

서 사용한 IR2118은 입력력이 역상되므로 이를 고려하여 입력을 주어야 한다.

2.3 퍼지 제어기

2.3.1 퍼지화

기준전압 V_{ref} 와 출력전압 V_o 의 차이가 E가 되고, E의 변화량이 CE가 된다. 이 두 변수는 퍼지제어기의 입력으로 사용된다. 다음은 샘플링구간 k 에서의 2개의 입력변수와 출력변수를 구하는 식을 나타낸다. 퍼지제어기는 태양전지의 출력전압을 V_{ref} 기준전압에 도달하도록 컨버터의 시비율을 제어한다.

$$E(k) = V_{ref} - V_o(k) \quad (1)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (2)$$

$$dD(k) = \text{Output of FLC} \quad (3)$$

퍼지화 과정은 퍼지제어기의 입력변수인 E와 CE를 퍼지추론을 위해 각각의 소속함수에 의해 퍼지 값으로 변환하는 과정을 말한다. 입력변수는 수치 값이고 퍼지제어기에서 쓰이는 변수는 퍼지집합을 기반으로 한 퍼지 값이므로 수치 값들의 퍼지화가 필요하다. 이런 과정은 자연적으로 존재하는 시스템과 인공적으로 만들어진 퍼지제어기의 인터페이스에 꼭 필요한 과정이다[4].

퍼지화 과정은 개념적으로 대집합 X에 있는 수치적인 값 x_0 를 하나의 퍼지 집합 A로 매핑하는 것을 말한다.

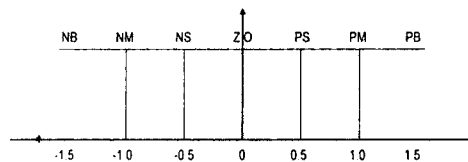
$$A = \text{fuzzifier}(x_0) \quad (4)$$

일반적으로 퍼지제어기에서 쓰이는 퍼지화 방법으로 퍼지 싱글톤(Fuzzy Singleton) 방법이 있다. 이 방법은 수치 값 자체를 싱글톤 퍼지집합이라는 특수한 퍼지숫자로 취급하는 방법이다. 즉, $x = x_0$ 라는 값이 주어진 경우, 퍼지화 연산 결과 퍼지집합 A는 다음과 같은 소속함수로 정의된다.

$$\mu_A = \begin{cases} 1, & \text{If } x = x_0 \\ 0, & \text{Otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

이 방법은 소속 함수가 특수한 극한값을 갖는 애매함이 없는 값으로서 구현하기가 쉽고, 다른 퍼지집합과의 연산도 간단하게 처리되기 때문에 잡음이 심각하지 않는 시스템 제어에 많이 쓰이고 있다[2]. 본 연구에서는 퍼지 싱글톤 방법을 이용하여 퍼지화를 하였다.

그림 1은 입력변수 E, CE의 소속함수로 PB(Positive Big), PM(Positive Medium), PS(Positive Small), ZO(Zero), NS(Negative Small), NM(Negative Medium), NB(Negative Big)의 7개로 퍼지값으로 구성된다. 퍼지화를 통하여 정해진 퍼지 값은 각각의 소속함수 값인 언어적 변수로 표현된다.



<그림 1> 입력변수 E, CE의 소속 함수

2.3.2 퍼지추론

본 연구에서는 전문적 지식에 의한 학습 방법을 적용하여 규칙을 만들었다. 우선 퍼지추론을 위한 퍼지규칙은 'IF- THEN-'의 형태로 표현된다. 예를 들어, IF E is PB AND CE is ZO THEN dD is PB 는 "최대동작전압과 출력측정전압의 차가 심하고, 그 차의 변화가 0일 때 시비율을 크게 증가시켜라" 라는 뜻이다[5].

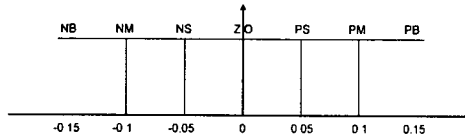
표 1은 전문적 지식에 의한 학습 방법을 적용하여 만든 퍼지규칙을 나타낸 것이다. 2개의 입력변수에 대해 7개의 소속 함수로 표현되므로 총 49가지의 규칙이 만들어진다.

〈표 1〉 퍼지규칙

CE							
E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	NB	NB	NB	NB	NM	NS	ZO
NM	NB	NB	NB	NM	NS	ZO	PS
NS	NB	NM	NS	NS	ZO	PS	PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PS	NM	NS	ZO	PS	PS	PM	PB
PM	NS	ZO	PS	PM	PM	PB	PB
PB	ZO	PS	PM	PB	PB	PB	PB

2.3.3 비퍼지화

비퍼지화는 퍼지추론에 의해 결정된 시비율의 퍼지 값을 실제 수치값으로 바꾸어 주는 과정을 말한다. 본 연구에서는 가장 간단한 형태의 비퍼지화 방법을 사용하였다. 퍼지 값인 시비율의 소속 함수가 가리키는 실제 값을 비퍼지화의 출력 값으로 하였다.



〈그림 2〉 출력변수 dD의 소속 함수

2.4 하드웨어 설계

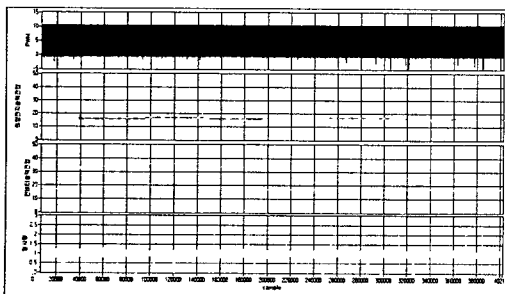
FPGA방식의 제어기는 HBE-Combo FPGA Training Kit에 탑재된 ALTERA사의 ACEX1K EP1K100QC208-3과 출력전압 검출을 위해 ADC0809CCN칩을 사용한 A/D변환모듈을 사용하였다. 제어기내부회로는 ALTERA사에서 제공하는 Max+PlusII와 VHDL을 이용하여 설계하였다. 마이크로프로세서방식의 제어기는 80c196kc를 사용하였다. 또한 마이크로컨트롤러인 80c196kc의 내장 A/D 변환부를 FPGA의 A/D 변환부 분해능 8bit와 동일한 조건으로 설정하여 태양전지의 출력전압을 센싱하였다. 퍼지 로직은 C언어를 사용하여 설계하였다.

2.5 실험 및 결과

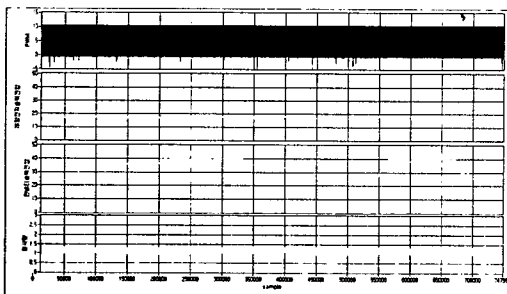
퍼지제어기의 하드웨어 구현방법에 따른 차이를 알아보기 위해 FPGA와 마이크로프로세서 방식 두 개의 실험 군으로 분류하였다. 경사면 기준 일사량 1kW/m²하에서 태양전지 입력에 변동을 주어 최대전력추종여부와 제어기의 특성을 실험하였다. 태양전지 출력의 최대를 100이라고 하였을 경우 상대적인 수치로 실험절차를 표기하였다.

- 실험 1 : 50%상태에서 25%단위로 100%까지 증가
- 실험 2 : 100%상태에서 25%단위로 50%까지 감소
- 실험 3 : 50%상태에서 50%단위로 100%까지 증가
- 실험 4 : 100%상태에서 50%단위로 100%까지 감소

그림 3과 4는 FPGA와 마이크로프로세서방식 각각에 대해서 실험1~4를 순차적으로 실험한 태양전지와 컨버터 출력전압을 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 FPGA로 실험한 결과 그래프



〈그림 4〉 마이크로프로세서로 실험한 결과 그래프

결과에서 알 수 있듯이 컨버터 출력전압 레벨의 변화가 있는 부분이 태양전지 모듈의 입력을 변화시킨 부분이다. 또한 태양전지 출력전압은 퍼지 제어기의 PWM 제어신호를 입력받아 정전압 제어에 의한 최대전력추종제어가 수행됨을 확인할 수 있다. 전체적인 결과를 비교할 때, FPGA 방식으로 구현한 제어기가 마이크로프로세서 방식의 제어기보다 안정적인 제어특성을 보여주고 있음을 알 수 있다.

표 3은 실험데이터 결과표이다. 결과를 종합해보면, FPGA로 구현한 퍼지 제어기의 성능이 더 우수함을 알 수 있다. 급격한 입력변화에도 최대동작전압을 잘 유지하고 있으며, 전압변동 또한 5% 이내로 우수한 특성을 보인다. 컨버터의 출력전압의 경우에도 실험1~4의 각 단계에서 안정적인 출력 특성을 보여주고 있다.

〈표 2〉 실험데이터 결과

구분	출력안정화 시간	리플율			
		FPGA	마이크로 프로세서		
실험1	50→75	2.5ms	26ms	5%	5%
	75→100	1.5ms	7.6ms	5%	5%
실험2	100→75	1.26ms	7.5ms	5%	5%
	75→50	2.5ms	28.75ms	4%	5%
실험3	50→100	2.75ms	28.75ms	5%	5%
실험4	100→50	1.8ms	68.75ms	4%	5%

3. 결 론

본 논문에서는 태양광발전시스템의 최대전력추종을 위한 컨버터제어에 퍼지제어 기법을 적용한 디지털 퍼지제어기를 구현하였다. FPGA와 마이크로프로세서 두가지 방식을 고려하여 설계하였다. 성능비교실험을 통해 디지털 퍼지제어기의 하드웨어 구현방법에 있어서 FPGA의 가능성을 제시하였다. 실험결과에 대한 원인을 분석해보면 다음과 같다.

첫째는 FPGA는 HDL코드로 설계하지만 구현된 결과는 hard-wired방식의 회로이고, 마이크로프로세서는 ROM에 저장된 내용을 읽고 쓰는 프로그램 방식이다. 정전압 제어알고리즘 같은 경우에는 복잡도가 그다지 크지 않은 알고리즘이지만, 만일 복잡도가 높은 다른 알고리즘을 놓고 비교하였을 경우에는 처리속도에 있어서 그 성능의 차이가 더 커질 것으로 예상된다. 이를 극복하기 위해서는 연산속도가 빠른 고가의 DSP가 필요로 하게 된다.

둘째는 제어기의 입출력 속도이다. 마이크로프로세서는 내부에 저장된 A/D 컨버터를 사용하기 때문에 FPGA에서 사용된 A/D컨버터보다 변환속도가 빠르다. 그러나 FPGA가 마이크로프로세서보다 입출력속도가 빠르기 때문에 전체적으로 제어기의 성능에 영향을 주게 된다.

셋째는 디지털 제어기의 특성에 그 원인이 있다. 디지털 제어기는 기본적으로 아날로그 입력 값을 디지털로 변환한 후 처리하기 때문에 변환과정에서 분해능이 매우 높은 A/D 컨버터가 있지 않는 한 초정밀 제어가 불가능하다. 그러나 결과에도 나타나듯이 정밀도가 그다지 높지 않아도 급격한 변동에 있어서는 제어특성이 안정적임을 알 수 있다.

끝으로 이상의 결과를 종합해보면, 디지털 퍼지제어기는 소규모 시스템의 경우 FPGA방식이 마이크로프로세서방식에 비해 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 또한 상대적으로 입력변수수와 제어대상이 많은 중대형 시스템에 적용할 경우, 마이크로프로세서는 고속연산이 가능한 고가의 프로세서가 필수적이고, 제어회로가 복잡해질 수 있다.

향후 FPGA와 마이크로프로세서를 혼용한 구현방식에 대한 연구를 진행하고자 한다.

이 논문은 2004년 산업자원부 에너지·자원기술개발사업 (2004-13-0053-3-010)에 의해 지원되었음

[참 고 문 헌]

- [1] 김세찬의 3인, "퍼지제어기를 사용한 태양광 발전시스템의 최대전력 추종제어", 전자공학회논문지 제32권 B편 제4호, pp.110-119, 1995.
- [2] 이선근, 권오석, "DC-DC 컨버터를 위한 강인한 성능을 가지는 퍼지제어기의 설계 및 구현", 전력전자학회논문지 제4권 제6호, pp.631-638, 1999, 12.
- [3] 차인수의 2인, "퍼지제어기를 이용한 전원용 DC-DC Converter에 대한 연구", 대한전자공학회 광주·전남부 학술발표회 논문집 제 10권 1호, pp.19-23, 1995.
- [4] 이정일, "태양광-풍력 복합발전시스템의 출력 제어 특성 분석", 동신대학교 대학원, 2003, 2
- [5] 김홍근의 2인, "계통연계형 태양광 발전시스템의 인버터 최적설계 및 실증연구", 기초전력연구원, 2004.