

소용량 태양광발전용 PWM제어기의 하드웨어 구현방식 비교

이흥주^{1*}, 이준하¹

A comparative study on implementation methods of PWM controller in small scale solar energy system

Hoong-Joo Lee^{1*} and Jun-Ha Lee¹

요약 본 연구에서는 태양광 발전시스템의 최대전력추종을 위해 퍼지 이론을 도입한 디지털 퍼지제어기를 설계하였다. 그리고 퍼지제어기의 디지털 설계를 위해 소용량 태양광 발전시스템의 각 부분을 구성하고 이를 적용하여 기존의 제어기와 비교 실험하였다. FPGA로 구현된 제어기는 기존의 마이크로프로세서로 구현된 제어기에 비해 일사량 변화에도 출력전압의 변동이 적은 안정적인 동작특성을 보였다.

Abstract In this study, we designed a digital fuzzy logic controller based on FPGA and microprocessor for MPPT of the solar power generation system. A fuzzy algorithm to control the power tracking function of a boost converter has been built into the FPGA, and applied to the small scaled solar power generation system. The embodied controller showed a stable operation characteristic with the small output voltage ripple for the intensity change of solar radiation. This result proves that the implementation of the power tracking controller using FPGA is an effective way compared to the existing one using microprocessors.

Key Words : 태양광발전, 승압형 컨버터, 퍼지제어기, FPGA

1. 서론

태양전지의 출력특성은 일사량, 동작전압 및 온도 등에 따라 동작특성이 변하고 최대출력점도 항상 변화한다. 일사량에 따른 태양전지 출력의 경우, 각 일사량에서의 최적 동작점인 출력전력의 최대점을 각각 가지고 있다. 이 최대출력점이 각 일사량 값에서 태양전지 에너지 효율이 가장 높은 점이라 할 수 있다. 이러한 최대 출력점은 일사량이나 주위 온도에 따라 변화한다. 또한 태양전지 제조업체마다 다르게 나타나며, 동일한 제조업체의 경우에서도 각각 출력이 다르게 나타날 수 있다. 따라서 상이한 조건에서도 최대 출력점에서 동작할 수 있도록 태양전지의 동작점제어가 필요하다[1]~[3].

기존의 제어기법은 태양광 발전과 같이 비선형 시스템을 제어하기 위해서는 보다 정확한 모델링이 필수조건이다. 하지만 시스템 모델링이 어렵고 설사 구현하더라도

이에 적절한 제어기를 설계하기가 쉽지 않다. 즉 태양광 발전과 같이 비선형 시스템을 제어할 경우 제어시스템의 수학적 모델링, 선형화 과정이 매우 복잡하고, 이득특성, 위상차, 최대 허용오차 등의 가정과 근사화에 의한 오차 발생, 한정된 제어범위 등 양질의 제어시스템의 구현이 현실적으로 매우 어렵다. 특히 그 구조 자체가 비선형특성이거나 시스템을 모델링하기 어려운 불명확한 대상, 제어변수가 대단히 많은 선형 시스템과 같은 대상, 또는 선형화된 제어모델일지라도 외란 및 기타 여건으로 인하여 순간적으로 비선형으로 변하는 제어대상의 제어기 설계는 현실적으로 매우 곤란하며, 설사 구현한다 할지라도 복잡한 상태변수 및 변수상호간의 관계를 실시간으로 계산할 수 있는 컴퓨터의 필요에 따라서 부피나 가격이 커지므로 실용성에는 상당한 어려움이 따른다.

위와 같은 이유로 해서 태양광 발전시스템의 발전효율을 높이기 위한 최대전력점 추종제어를 위해서는 운전자의 경험에 의한 제어가 기존의 제어기를 통한 제어보다 효과적일 수 있다. 퍼지제어 기술은 운전자의 경험과 노하우에 기초한 지능형 제어의 선두기술로써, 산업현장에

¹상명대학교 컴퓨터시스템공학과

*교신저자: 이흥주(hjlee@smu.ac.kr)

서 종종 사용되어 그 효과가 입증된 바 있다. 퍼지제어기의 구성은 현실적인 수치값 또는 언어적 정보를 퍼지값으로 변환하는 퍼지화(fuzzifier), 퍼지규칙 정보를 가지고 있는 퍼지규칙베이스(fuzzy rule base), 입력된 퍼지값과 해당되는 퍼지규칙들로부터 추론 결과를 도출하는 퍼지추론엔진(fuzzy inference engine) 및 추론된 퍼지집합을 수치값으로 변환하는 비퍼지화(defuzzifier)로 구성된다. 퍼지제어는 비선형 고차 미분방정식을 풀지 않고도 제어 시스템의 제어알고리즘을 만들 수 있다. 다시 말해서, 복잡한 수학적 모델에 의존하지 않고도 전문가의 직감이나 경험상의 법칙, 실제 실험 또는 모의실험의 데이터를 통해서 제어에 필요한 규칙들을 유도해 낼 수가 있다. 또한 퍼지제어는 허용오차 범위 안에서 하드웨어의 도움으로 고속의 결과를 얻을 수 있고, 하드웨어가 비교적 저가로 구성할 수 있으며 서로 다른 제어대상에 대해 쉽게 같은 구조의 제어기를 사용할 수 있는 장점이 있다[4]~[6].

따라서 본 논문에서는 태양광발전의 최대 출력점 추종 제어에 퍼지이론을 이용한 제어방법을 고려한다. 또한 퍼지제어기 구현방법에 있어서 종래에는 마이크로프로세서를 사용한 방식이 대부분이었으나, 여기서는 FPGA에 기반을 둔 구현방법을 고려하여, 두 가지 제어기 구현방식에 대해 비교분석하였다. FPGA는 마이크로프로세서에 비해 재설계가 용이하고, 구현된 하드웨어는 회로방식으로 빠른 처리속도를 가지며 실제 구현에 있어서 로직의 최적화를 통해 불필요한 연산과정을 줄일 수 있는 장점을 가지고 있다[7]~[9].

2. 본 론

2.1 태양광 발전부

태양광 발전부는 50W로 25W급 1개와 12W급 2개의 태양전지를 병렬 연결하여 총 3개의 모듈로 구성된다. 일사량 변동에 따른 실험변수를 주기 위해 3개의 태양전지 간의 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[5].

2.2 전력 변환부

전력변환부에서는 승압형컨버터를 기준으로 아날로그

입력 센싱(sensing), 신호증폭, 게이트구동회로가 포함된다. 태양전지의 출력전압범위는 0~20.8V인데 반해 디지털 제어기의 A/D변환부는 0~5V 범위로 제한되기 때문에 전압레벨의 변환과정이 필요하다. 수kV급의 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 도통 시 최소 10V이상이기 때문에 디지털 제어기의 출력을 보정하고 증폭하는 회로가 추가적으로 요구된다. 본 연구에서는 신호를 증폭하는 방법으로 OP-amp를 활용하였다. 게이트구동회로의 입력전압은 6.6V($V_{cc}=11V$)이상에서 logic '0', 3.8V($V_{cc}=11V$)이하에서 logic '1'의 전압을 출력한다. logic '1'의 전압은 12V정도이며, 이는 컨버터에 사용된 MOSFET 스위치를 안정적으로 동작시키기 위해 충분한 전압이다. 본 실험에서 사용한 IR2118은 입출력이 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 k에서의 2개의 입력변수와 출력변수를 구하는 식을 나타낸다.

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

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

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

퍼지제어기는 태양전지의 출력전압을 V_{ref} 기준전압에 도달하도록 컨버터의 시비율을 제어한다.

퍼지화 과정은 퍼지제어기의 입력변수인 E와 CE를 퍼지추론을 위해 각각의 소속 함수에 의해 퍼지값으로 변환하는 과정을 말한다. 입력변수는 수치값이고 퍼지제어기에서 쓰이는 변수는 퍼지집합을 기반으로 한 퍼지값이므로 수치값들의 퍼지화가 필요하다. 이런 과정은 자연적으로 존재하는 시스템과 인공적으로 만들어진 퍼지제어기의 인터페이스에 꼭 필요한 과정이다[6].

퍼지화 과정은 개념적으로 대집합 X에 있는 수치적인 값 x_0 를 하나의 퍼지집합 A로 맵핑하는 것을 말한다.

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

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 소속 함수로 정의된다.

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

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[4]. 본 연구에서는 퍼지 싱글톤 방법을 이용하여 퍼지화를 하였다. 그림 1은 입력 변수 E, CE의 소속 함수로 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 퍼지값은 각각의 소속 함수 값인 언어적 변수로 표현된다.

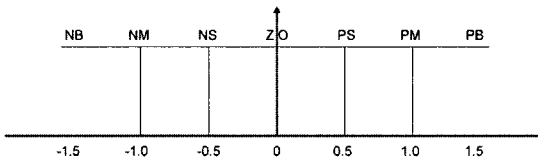


그림 5. 입력변수 E, CE의 소속 함수

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 |

2.3.2 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 시비율(duty ratio)을 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.

2.3.3 비퍼지화

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

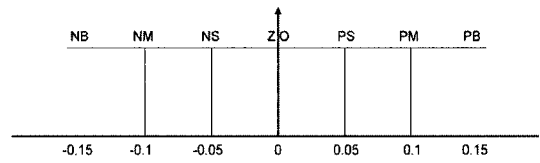


그림 6. 출력변수 dD의 소속 함수

2.4 하드웨어 설계

FPGA방식의 제어기는 HBE-Combo FPGA Training Kit에 탑재된 ALTERA사의 ACEX1K EPIK100QC208-3 과 출력전압 검출을 위해 ADC0809CCN칩을 사용한 A/D 변환모듈을 사용하였다. 제어기내부회로는 ALTERA사에서 제공하는 Max+Plus II 와 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.

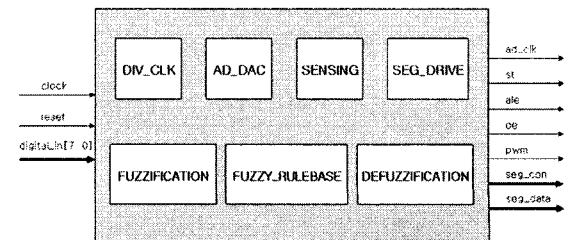


그림 3. FPGA로 구현한 퍼지제어기 block diagram

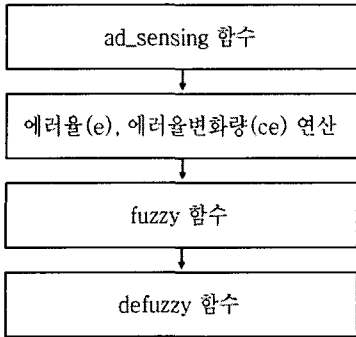


그림 4. 마이크로프로세서로 구현한 퍼지제어기

2.5 실험 및 결과

서론에서 언급한 것과 같이 태양전지의 출력은 일사량에 가장 크게 의존하기 때문에 일출, 일몰시간 그리고 구름의 정도에 따라 전력 변화가 심하게 이루어진다. 즉, 일사량이 높고 일정한 11~15시를 중심으로 태양광 발전이 이루어지고 일출, 일몰 전후에는 일사량의 낮고 변화가 심하기 때문에 발전 효율이 떨어진다. 태양전지의 표면의 온도 또한 중요한 요인으로 작용하기 때문에 온도가 낮은 겨울의 경우에는 출력이 저하되는 현상이 발생한다. 이렇게 일사량의 변동이 심하거나 여러 가지 외부 저해 요인으로부터 최적으로 안정적인 출력을 내보내고 최대 출력점을 찾기 위해 MPPT(Maximum Power Point Tracking)가 필요하며 여기서는 퍼지제어를 통하여 프로세싱 한다.

퍼지제어기의 특성과 최대 전력치 추종여부를 실험하기 위한 실험 환경을 요약하면 다음과 같다.

- 1) 태양전지 모듈 : 25W급 1개와 12W급 2개를 병렬로 연결
- 2) 최대전력추종제어 : 퍼지제어기를 이용한 승압형컨버터의 시비율제어
- 3) MPPT 제어방법 : 승압형 컨버터를 이용한 정전압 제어
- 4) 부하 및 센서 : 저항부하연결, 태양전지와 컨버터의 출력전압을 측정하기 위한 전압분배 회로, 일사량 측정을 위한 일사량 센서장착
- 5) 데이터 모니터링 : DAQ보드와 LABVIEW를 이용한 데이터 계측

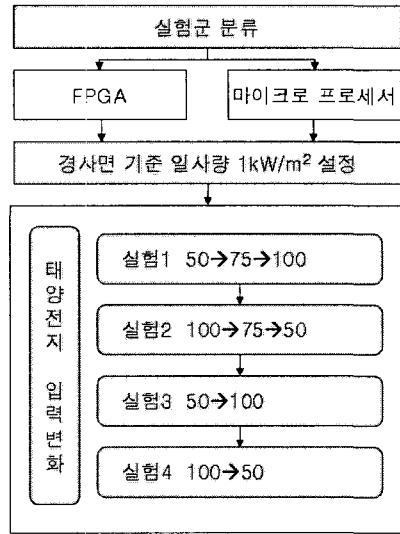


그림 5. 실험절차 블록도

퍼지제어기의 하드웨어 구현방법에 따른 차이를 알아보기 위해 FPGA 와 마이크로프로세서로 구현된 두 개의 실험 군으로 분류하였다. 경사면 기준 일사량 1kW/m²에서 태양전지 입력에 변동을 주어 MPPT 추종여부와 제어기의 특성을 실험하였다. 위의 그림 5는 실험절차를 도식한 것이다. 태양전지 출력의 최대를 100이라고 하였을 경우 상대적 수치로 실험절차를 표기하였다. 예를 들면 100%는 일사량1kW/m²일 때 태양전지 출력 50W를 의미한다.

- 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 6과 7은 FPGA와 마이크로프로세서 각각에 대해서 실험1~4를 순차적으로 실험한 태양전지와 컨버터 출력전압을 나타낸 것이다. 그래프에서 알 수 있듯이 컨버터 출력전압 레벨의 변화가 있는 부분이 태양전지 모듈의 입력을 변화시킨 부분이다. 또한 태양전지 출력전압은 퍼지제어기의 PWM 제어신호를 입력받아 정전압 제어에 의한 MPPT가 수행됨을 확인할 수 있다. 전체적인 결과를 비교할 때, FPGA로 구현한 제어기가 마이크로프로세서로 제어기보다 안정적인 제어특성을 보여주고 있다.

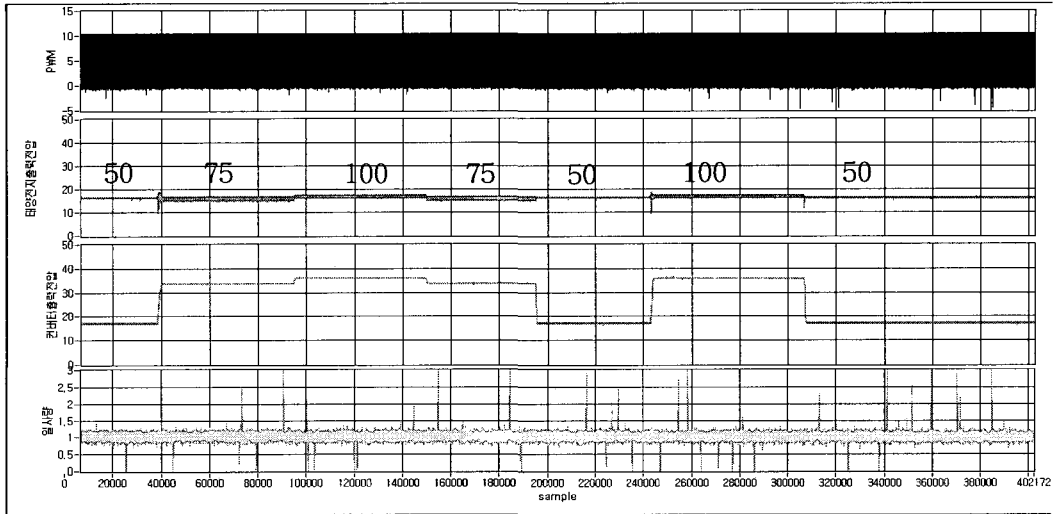


그림 6. FPGA로 구현한 제어기 출력특성

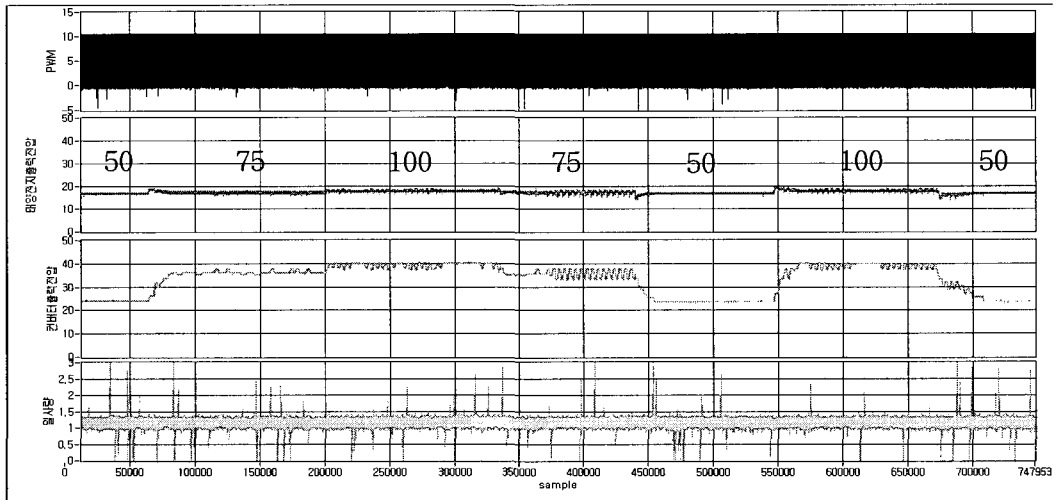


그림 7. 마이크로프로세서로 구현한 제어기 출력특성

다음의 표 2의 실험결과를 종합해보면, 실험군중 FPGA로 구현한 퍼지제어기의 성능이 보다 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 출력특성을 보여주고 있다

표 2. 실험데이터 분석결과

| 항 목 | 구 분 | 출력안정화 시간 | | 리플율 | |
|-----|--------|----------|-----------|------|-----------|
| | | FPGA | 마이크로 프로세서 | 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 | 2.8ms | 48.75ms | 4% | 5% |

출력안정화 시간의 경우에는 실험1,2에서 75와 100사이 입력변화에 대해 FPGA가 마이크로프로세서에 비해 5배, 75와 50사이 입력변화에 대해 10배정도 빠른 추종시간을 갖는다. 실험3,4에서는 50과 100사이의 변화에 대해 증가시 FPGA가 마이크로프로세서에 비해 10배, 감소시 17배의 추종시간의 차이를 보인다. 전체적으로 FPGA가 마이크로프로세서에 비해 5~10배의 빠른 추종시간을 가진다고 할 수 있다. 이러한 결과는 두 하드웨어의 연산속도의 차이에 그 원인이 있다고 할 수 있다. FPGA는 HDL 코드로 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. 이는 실험1,2의 50에서 75의 변화와 75에서 100변화에 대한 추종시간을 비교해보면 알 수 있다. 설계된 퍼지제어기는 낮은 일사량 대역에서 더 세밀하게 변화하게 되는데, 세밀한 변화만큼 그에 따른 연산의 양도 늘어나게 된다. 그렇기 때문에 50에서 75, 75에서 100 모두 변화량이 25인데 반해 추종시간의 차이는 약 3.5배정도 차이를 보이는 것이다. 리플율은 각 고정 시비를 값에 대한 전압 변동 폭이며, 두 경우 모두 4~5%로 양호한 결과를 보이고 있다.

3. 결론

본 논문에서는 소규모 태양광발전시스템의 최대전력 추종을 위해 퍼지이론을 이용한 퍼지제어기를 설계하고, 이를 마이크로프로세서와 FPGA두 가지 형태로 구현하여 비교분석하였다. 이를 위해 태양광 발전부, 전력 변환부, 퍼지제어기, 데이터계측부로 구성된 50W급 태양광발전시스템을 구성하였다. 태양광 발전부는 일사량의 급격한 변화에 대한 실험을 위해, 25W 1개와 12W 2개를 병렬연결 하였고, 전력변환은 승압형 컨버터를 이용하였다. 승압형 컨버터의 시비를 제어 위해 퍼지이론을 도입한 퍼지제어기를 설계하고, 마이크로프로세서와 FPGA를 이용한 두 개의 제어기를 구현하여 실험하였다. 또한 실험시 지속적인 데이터 획득을 위해 DAQmx보드와 LABVIEW언어를 사용한 데이터 계측시스템을 구성하여 모니터링 하였다.

실험결과 FPGA로 구현한 제어기가 마이크로프로세서로 구현된 제어기에 비해 5~10배정도의 빠른 출력안정화 시간을 보였고, 특히 낮은 일사량에서의 입력변화에 대해 그 차이가 크게 나타나며, 연산량 증가에 따른 처리속도의 비도 FPGA로 구현한 제어기가 2.1배정도 더 우수한 특성을 보였다.

본 논문에서 제시한 결과가 보다 신뢰성을 얻기 위해서는 아직 미비점이 남아있다. 실험변수로서 일사량과 함께 온도에 대한 특성을 파악하는 것과, 규모의 면에서 중대규모의 태양광발전시스템의 적용여부를 확인하는 것이다. 또한 개선된 알고리즘 개발과 함께 그에 적합한 하드웨어 구현방식에 대한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Roger A. Messenger, Jerry Ventre, "Photovoltaic Systems Engineering", CRC Press, pp.75-101, 2004.
- [2] 김홍근외 2인, "계통연계형 태양광 발전시스템의 인버터 최적설계 및 실증연구", 기초전력연구원, pp.70-76, 2004.
- [3] 김세찬외 3인, "퍼지제어기를 사용한 태양광 발전시스템의 최대전력 추종제어", 전자공학회논문지 제32권 B편 제4호, pp. 110-119, 1995.
- [4] 이선근, 권오석, "DC-DC 컨버터를 위한 강인한 성능을 가지는 퍼지제어기의 설계 및 구현", 전력전자학회논문지 제4권제6호, pp.631-638, 1999. 12.
- [5] 차인수의 2인, "퍼지제어기를 이용한 전원용 DC-DC Converter에 대한 연구", 대한전자공학회 광주전남부 학술발표회 논문집 제 10권 1호, pp.19-23, 1995.
- [6] 이정일, "태양광-풍력 복합발전시스템의 출력 제어 특성 분석", 동신대학교 대학원, 2003. 2.
- [7] Ying-Yu Tzou, Hau-Jean Hsu, "FPGA Realization of Space-Vector PWM Control IC for Three-Phase PWM Inverters", IEEE-PE, Vol.12, No.6, Nov 1997.
- [8] Ying-Yu Tzou, Tien Sung Kuo, "Design and Implementation of an FPGA-Based Motor Control IC for Permanent Magnet AC Servo Motors", 1998.
- [9] Tazi. K, Monmasson E, "Contribution to Multimachine Speed Control Device Architectures Preliminary DSP Based Control Realization with View of FPGA Architecture Design", Proceeding PCIM'97 Intelligent Motion, June 1997.

이 흥 주(Hoong-Joo Lee)

[종신회원]



- 1987년 2월 : 한양대학교 전자공학 학과 (공학사)
- 1989년 2월 : 한양대학교 전자공학 학과 (공학석사)
- 1995년 2월 : 뉴욕주립대 전기전자컴퓨터공학과(공학박사)
- 1995~1999년 : 삼성전자 반도체 연구소

- 2000~2001년 : (주)포톤반도체에너지
- 1999년~현재 : 상명대학교 컴퓨터시스템공학과 교수

<관심분야>

반도체, 대체에너지

이 준 하(Jun-Ha Lee)

[정회원]



- 1990년 2월 : 중앙대학교 전자공학 학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 중앙대학교 전자공학 학과 (공학석사)
- 1996년 2월 : 중앙대학교 전자공학 학과(공학박사)
- 1996~2003년 : 삼성전자 반도체 연구소

- 2003년~현재 : 상명대학교 컴퓨터시스템공학과 조교수

<관심분야>

반도체, 나노 테크놀로지