

# 유전자 알고리즘 기반 무결점 초고효율계통 연계형 인버터개발

(Genetic algorithm-based ultra-efficient MPP tracking in a solar power generation system)

최대섭\*, 송민중, 김영민

(Dae-seub Choi, Min-jong Song, Young-min Kim)

Abstract

This paper a new method which applies a genetic algorithm for determining which sectionalizing switch to poerate in order to solve the distribution system loss minimization re-configuration problem. In addition, the proposed method introduces a ultra efficient MMP tracking in a solar power generation system.

Key Words : 태양광발전, GA, 배전계통

## 1. 서론

### 1.1. 개발기술의 중요성

에너지 이용률 향상을 위한 고효율/지능형 인버터의 개발은 태양 PV Sell의 최대 효율이 약 15-17[%]정도로 낮고, 날씨/온도에 따라 가변되기 때문에 이 전력에 대한 최대전력 추종(MPPT)제어가 필요하며 이를구현하기 위해서는 지능형에 기반한 제어알고리즘의 도출이 필요하다. 또한 태양으로부터 얻을 수 있는 최대의 에너지를 이용하기 위해서는 중간 전력변환기의 효율을 극대화해야 하는데, 현재 국내 제품들의 경우 94[%], 해외의 경우 최대 96[%]까지 나타나지만 이들보다는 효율 특성이 더 높아야만 경쟁력을 확보하면서 전체 시스템의 효율향상을 기할 수 있다. 본 논문에서는 스위칭 방식의 개선 및 유전자 알고리즘에 기반 한 고효율/지능형 인버터의 에너지 효율의 극대화 할 수 있는 방법등을 고려하였다. 또한 모니터링시스템 진원문제는 무정전 전원 공급 장치를 설치함으로써 문제점을 해결할 수 있다.

위상오차율 최소화를 위한 강인형 PLL제어 기술

의 개발 : 계통 연계시 정확한 위상동기화가 이루어지지 않을 경우 순환전류의 문제 및 빈번한 고장 등의 심각한 문제를 발생 시킬 수 있다. 현재 태양광 인버터 시장에서 유명한 독일의 SMA 사에서도 상전의 법적 기준 위상에 맞추어 계통 연계 시 위상 변조 오차율이  $\pm 0.5$ [%]정도로 미흡한 실정이다. 따라서 위상 변조 및 연계 기술의 중요성은 사고의 위험성에 직접적인 관계가 있으므로 이를 예방하여 설비 및 계통 시스템을 보호하기 위해서는 순시적 위상검출 및 실시간 위상변조 알고리즘이 삽입되어야 한다. 따라서 디지털 논리변환에 기반한 새롭고도 강인한 PLL 제어 기술을 개발하여 위상오차를 최소화 한다.

유전자 알고리즘을 적용한 자가진단 및 연계형 보호기술의 개발 : 계통과 연계되는 전력변환 시스템의 사고는 매우 치명적인 결과를 초래한다. 계통의 사고 지점에 대한 전기 유입도 마찬가지로 더욱 큰 사고를 불러올 수 있다. 따라서 이러한 위험 요소를 최소로 줄이기 위해서는 계통의 사고를 미연에 확인 가능한 새로운 단독 운전 방

지 기술, 자가진단 치료기술 및 연계형 보호기술의 개발이 반드시 필요하며 이를 위해 본 개발에서는 유전자 알고리즘에 기반한 자기동조(Auto-tuning)형 능동적 무결점 인버터 시스템을 개발하고자 한다.

연에 확인 가능한 새로운 단독 운전 방지 기술, 자가진단 치료기술 및 연계형 보호기술의 개발이 반드시 필요하며 이를 위해 본 개발에서는 유전자 알고리즘에 기반한 자기동조(Auto-tuning)형 능동적 무결점 인버터 시스템을 개발하고자 한다.

유전자 알고리즘을 적용한 자가진단 및 연계형 보호기술의 개발 : 계통과 연계되는 전력변환 시스템의 사고는 매우 치명적인 결과를 초래한다. 계통의 사고 지점에 대한 전기 유입도 마찬가지로 더욱 큰 사고를 불러올 수 있다. 따라서 이러한 위험 요소를 최소로 줄이기 위해서는 계통의 사고를 미연에 확인 가능한 새로운 단독 운전 방지 기술, 자가진단 치료기술 및 연계형 보호기술의 개발이 반드시 필요하며 이를 위해 본 개발에서는 유전자 알고리즘에 기반한 자기동조(Auto-tuning)형 능동적 무결점 인버터 시스템을 개발하고자 한다.

전원의 불평형 보상 알고리즘의 개발 : 계통상에서 선로 임피던스 파라미터의 불평형 등에 의한 전원 전압의 불평형은 시스템 전체의 효율저하 및 제어의 불안정조건을 충족하게 된다. 특히 3상의 계통에서는 d-q축 변환이론을 적용하여야 하는데, 이는 전원의 평형조건에서 가능하므로 이의 불평형에 대한 능동형 보상알고리즘의 기술 개발이 필요하다.

EDLC를 적용한 전력보상회로의 기술 개발 : DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터의 연계(Link)점에 사용되는 캐패시터를 기존의 전해캐패시터 대신에 슈퍼캐패시터(전기이중층 캐패시터; EDLC)를 사용하여 효율향상 및 수명연장, 폭발의 위험의 탈피하고, 특히 제어전원의 연장에 의하여 능동형 자가진단의 기능을 강화하고 응급처치시간을 자동으로 수행하도록 한다.

## 2. 국외 관련기술 현황

### 2.1. 국외기술현황

#### ①. 일본의 경우

일본의 대표적인 대체에너지 기업은 Sharp로써 미국 시장 등을 겨냥하여 많은 투자를 하고 있다. 이 회사의 인버터는 효율이 최고 94[%]이며 계통연계가 가능하다. 현재 Sharp사는 주로 태양광 모듈 개선에 중점을 두고 있다.

#### ②. 미국, 캐나다의 경우

태양광발전의 세계 3두마차라는 명색에 걸맞게 독일, 일본과 더불어 많은 기술을 보유하고 있다. 그중 Ballard사는 인버터의 최고 효율을 96[%]로 표기하고 있으며 계통연계가 가능하다.

#### ③. 독일의 경우

대체에너지 분야에서 가장 선진국으로 자부하며 전 세계 태양광 시장에서 선점을 하고 있다. 그중 SMA사의 인버터가 높은 신뢰도를 얻고 있으며 연계형 모델로 Sunny Island라는 제품을 출시하고 있다. 이 제품의 최종 출력은 60[Hz]로 결정되어 있고 연계시 상전과의 오차율이  $\pm 0.5$  [%]를 넘고 있으며 인버터 효율은 최상의 조건에서 최고 95[%]이다. SMA사는 계통연계형의 개선에 중점을 두고 지속적인 개발을 진행해 오고 있다.

## 3. 개발내용 및 개발범위

### 3.1. 개발내용 및 개발범위(시스템 구성도, 구조공은 그림으로 표현)

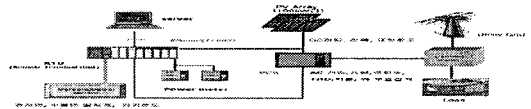


그림1 태양광발전시스템의 구성 개념도

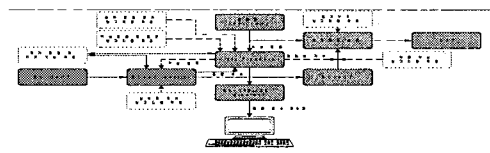
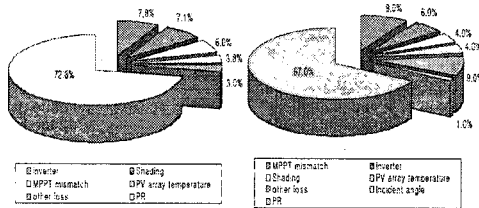


그림 2. 고효율 계통연계 지능형 인버터 시스템의 구성도

- 유전자알고리즘에 기반한 최대전력 추종(MPPT) 제어에 의한 시스템의 고효율화
- PV sell은 일사량, 온도 등의 주위 환경에 영향을 많이 받는다. 따라서 PV sell을 최대한 효율적으로 이용하기 위해서는 실시간으로 최대전력점을 추종하여 최대전력을 끌어내는 기법이 필요하다.
  - 그림 3에서와 같이 MPPT miss match에 의한 손실이 전체의 약 9%정도로 나타나고 있다.
  - 유전자 알고리즘을 적용하여 최대전력점 추종 제어 알고리즘을 개발한다.



일본 모니터링 프로그램 : 100 PV 시스템      평가분석 : 421개소 PV시스템

그림 3. PV 시스템 손실요인 분포  
(태양광발전시스템 성능평가분석, 2006.06, 한국에너지기술연구원)

유전자 알고리즘에 기반한 계통 연계 및 보호회로의 구성과 제자

- 분산전원의 계통연계는 정확하고 빠른 계통 전압의 위상동기가 이루어 져야 한다. 위상동기는 노이즈나 외란이 유입될 경우에도 계통 전압의 위상은 순시적으로 정확하게 검출되어야 한다. 또한 전력 조류의 제어를 위한 계통연계 인버터 출력의 전압, 전류의 제어 알고리즘이 필요하다.
- 고속 CPU를 이용하고 유전자 알고리즘을 적

용하여 안전한 계통과 자동 연계 및 해제가 가능하도록 계통연계 알고리즘을 구현하고 제작한다.

- 시스템 및 계통의 보호를 위한 보호회로를 구성한다.

표 1. PCS의 성능시험결과(한국에너지기술연구원)  
(태양광발전시스템의 성능평가분석, 2006.06. 한국에너지기술연구원)

PCS의 성능특성			
시험항목	1/3정격	1/2정격	정격시
변환효율	92.58%	93.61%	93.88%
중합 왜율(전류)	2.57%	1.78%	1.19%
역률	0.998	0.993	0.991
최대전력추종	99.6%	99.9%	99.8%

위상 검출 및 실시간 변조 알고리즘 구현에 기반한 100[kVA]급 인버터 적용기술 개발

- 기존의 PLL 기법은 노이즈에 취약하고 고효율 계통연계를 위해서는 정확한 위상검출과 변환 알고리즘이 필요하다. 따라서 노이즈에 강한 PLL 알고리즘의 개발이 필요하다.
- 따라서 새로운 PLL 알고리즘을 구현하고 100kVA급 인버터에 적용한다.
- 고효율 스위칭방식에 의한 최대효율 95[%] 위상 변조 오차율  $\pm 0.3$ [%]이내 구현
- 개선된 PLL 알고리즘을 개발하여 정확한 위상을 검출하고 시간지연 등의 보상알고리즘을 구현하여 계통연계시 위상 변조 오차율을  $\pm 0.3$  이내로 구현한다.
- 계통 연계보호 알고리즘 개발 및 적용
- 태양광 발전 설비는 계통에 연계되어 운전될 경우 원만하고 효율적인 계통연계가 이루어 져야한다.
- 따라서 전력품질과 공급신뢰도를 유지하고

계통의 전력품질을 향상시킬 수 있도록 운전되어야 하며, 설비 보호를 위한 보호협조가 필요하다.

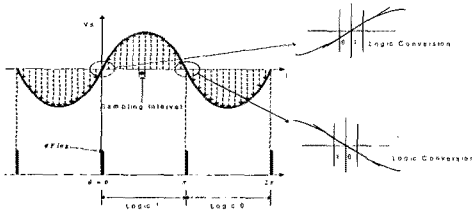


그림 4. 개선된 위상각 검출 알고리즘 개념도(논리변환게이트 삽입)

#### 단독운전방지 알고리즘 개발 및 적용

- 단독운전은 계통 측의 전원에서 전력공급이 중단된 상태이다. 계통의 사고 또는 정전발생 시 선로의 유지/보수 및 기타의 사유로 계통을 차단하였을 때 PV 시스템이 이를 검출하지 못하여 배전선에 계속해서 전력을 공급하는 현상이다.
- 단독운전이 발생하여 계통 측으로 전력공급을 계속하게 될 경우 계통공사인력에 대한 안전을 보장할 수 없으며 전압원이 없어진 상태에서 부정확한 주파수에 동기하여 시스템이 동작하게 된다.
- 따라서 새로운 단독운전 방지 기법을 개발하여 계통이 차단되었을 경우 연계를 해제하고 계통이 확립되었을 때 자동으로 연계되는 기술 개발이 필요하다.

#### 고효율 스위칭 방식에 의한 인버터효율 극대화 알고리즘 개발

태양광발전 시스템은 PV sell의 낮은 에너지 이용률로 인해 전력변환장치의 효율이 낮을 경우 종합효율이 매우 낮아지게 된다. 따라서 고효율의 전력변환장치를 개발하여 태양광발전 시스템의 종합효율을 극대화 할 필요가 있다. 최적의

설계를 통한 고효율 인버터를 구현하기 위하여 고효율 스위칭 기법인 Double Carrier PWM 기법을 적용하여 고효율을 기하고 이를 평가한다.

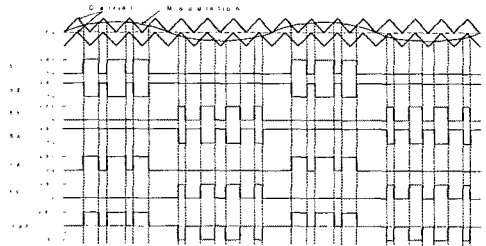


그림 5. 더블 캐리어 방식의 PWM 동작의 개념도

#### 고성능 DSP제어보드의 개발

- TI사에서 개발한 TMS320c32의 제어보드개발
- 고성능의 32비트 부동소수점 연산방식의 범용 DSP로서, 초저가형 모델을 개발
- FPGA에 기반한 시스템인터페이스 회로도 장착

#### 3상 전원 불평형조건의 보상 알고리즘 개발

- 계통상에서 선로 임피던스 파라미터의 불평형 등에 의한 전원 전압의 불평형은 시스템 전체의 효율저하 및 제어의 불안정조건을 충족하게 된다. 특히 3상의 계통에서는 d-q축 변환이론을 적용하여야 하는데, 이는 전원의 평형조건에서 가능하므로 이의 불평형에 대한 능동형 보상알고리즘의 기술개발이 필요하다.

#### 고효율 스위칭 구동회로에 의한 인버터의 효율 극대화 알고리즘 개발

- 그림 6에 IGBT의 구동회로를 간략히 나타낸 것으로서, IGBT의 Turn-On, Turn-Off의 스위칭 속도는 저항  $R_{on}, R_{off}$  의 값에 따라 매우 다르다.

#### DSP제어보드의 성능개선 및 부분 On-chip 화 구현

- TMS320c32의 제어보드 업그레이드
- FPGA의 기능확대에 의한 시스템 온 칩기능 확대

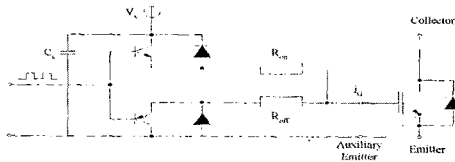


그림 6 IGBT의 간략한 구동회로

- 따라서  $R_{on}$ ,  $R_{off}$  값의 변화는 아래 표와 같이 IGBT의 총 허용손실 및 최대 스위칭 주파수, 구동 기능과 관계되므로 이의 허용 범위 내에서 최적의 조합을 결정하여 추구하고자 하는 고효율의 인버터를 구현할 수 있다.

표 2. 저항  $R_{on}$ ,  $R_{off}$  의 변화시 스위칭 특성

저항 $R_{on}$ 증가시	저항 $R_{off}$ 증가시
▷. Turn-On delay증가	▷. Turn-OffLoss 증가
▷.Freewheeling Diode의 Turn-Off Loss 감소	▷.Turn-Off delay증가
▷.Total스위칭Loss증가	▷.보다 낮은 $dv/dt$ , falling time 증가
▷.보다 낮은 $dv/dt$	▷.Overvoltage peak 감소
▷.Freewheeling Diode의 Peak reverse전류감소	▷. $dv/dt$ 에 의한 IGBT의 높은 민감성

DSP제어보드의 성능개선 및 부분 On-chip화 구현

- TMS320c32의 제어보드 업그레이드
  - FPGA의 기능확대에 의한 시스템 온-칩기능 확대
  - 사용자 편의기능 소프트웨어 보강
- 시뮬레이션에 의한 전력변환회로의 고성능/고효율 토폴로지의 도출

- DC/DC 컨버터와 DC/AC 인버터의 연계 (Link)점에 사용되는 캐패시터를 기존의 전해캐패시터 대신에 슈퍼캐패시터(전기이중층 캐패시터; EDLC)를 사용하여 효율향상 및 수명연장, 폭발의 위험의 탈피하고, 특히 제어전원의 연장에

의하여 능동형 자가진단의 기능을 강화하고 응급 처치시간을 자동으로 수행하도록 함.

- 따라서 EDLC의 고효율 제어기법 연구
- DC 및 AC부의 다양한 전력변환회로의 시뮬레이션 결과도출
- 시뮬레이션 연계에 의한 최적의 파라미터 도출

## 4. 결론

- (1). 태양광발전 시스템에 이용되는 전력변환장치는 전력변동에 대하여 정전압의 높은 신뢰성을 보장할 수 있어야 하며, 계통과 연계시 상호협조 관계를 유지하여야 한다.
- (2). 계통주파수를 인버터 제어신호로 사용하여 인버터 출력을 계통과 위상차이가 없는 전력을 부하여 공급 할 수 있었다. 이와 더불어 이론을 바탕으로 제작된 실 시스템에서 발생하는 구조적인 문제점과 관리적인 문제점을 검토하여 다음과 같이 해결 대책을 강구하였다. 구조적인 문제점은 짧은 시간내에 해결 될 수 있는 사안이 아니지만, 설치지역에 대한 장기적인 일사량 측정과 설치장소의 최적설계 드의 대안을 적용함으로써 발전 효율을 높여야 한다.

## 참고 문헌

- [1]최대섭 "배전손실 최소화 문제에 있어서 유전 알고리즘의 수속특성의 관한 검토", 전기학회 전력기술 연구회자료
- [2] L.Davis, "Handbook of Genetic Algorithms", Van Nostrand Reinhold(1991)
- [3]K. Deiong, "An analysis of the Behavior of a Class of Genetic Adaptive Systems, Ph.D thesis, University of Michigan(1975)
- [4] 최대섭 "배전손실 최소화문제에 유전알고리즘의 적용", (1994)
- [5]K.Nara,etal., "Implementation of Genetic Algorithm for Distribution System Loss Minimum Reconfiguration", IEEE Trans. Power System, Vol.7,No3,p.1004 (1992)
- [6] D. Whitely, & T.Hanson, "Optimizing Neural Networks Using Faster, More Accurate Genetic Search", Proc. of ICCA-89. (1989)