

# 유도가열용 전원장치 개발

오성철, 김요희, 계문호, 하성운

한국전기연구소

Development of Power Supply for Induction Heating System

D.W. YOO, S.C. OH, Y.H. KIM, M.H. KYE, S.U. HA

(KERI)

## Abstract

This paper describes a POWER MOSFET inverter suitable for medium frequency induction heating applications. A series scheme is employed, which is operated at zero phase of the resonant load by PLL control. This ensures maximum power transfer, good efficiency, low EMI noise and reliable operation.

Circuit configuration and performance are discussed and design criteria are given. Implementation of a prototype rated at 5KW, 100~300KHz is described and experimental results are given.

## I. 서론

최근 정지형 전력변환장치의 스위칭 소자로서 종래의 Thyristor 대신에 자기소호형 소자 (POWER MOSFET, IGBT, SIT 등) 들을 사용하여 그 주파수 대역이 수십 KHz ~ 수백 KHz 까지의 고효율 스위칭 동작이 안정되게 실현될 뿐만 아니라 새로운 스위칭 방식 (공진형: Resonant Type) 을 도입함으로써 실제 응용상 장치의 소형·경량화, 고효율화, 저 Noise 화 및 제어 성능 향상등의 장점이 있고 그 운전 동작 영역의 확장도 가능케 하였다.

이와 같은 추세에 따라 본 연구소에서는 종래의 Thyristor 고주파 인버터 회로 기술을 기초로하여 자기소호형 소자를 사용한 고효율 고주파 유도가열용 전원장치 개발에 착수하게 되었다. 종래 국내의 공업 분야에서 주로 사용되어 온 열원인 Gas 배출에 의한 작업 환경의 오손, 보수관리의 난이성, 그리고 화재의 위험성이 항상 문제로 되고 있다. 그러나 PE 응용

기술인 고주파 인버터를 적용한 공업용 전열장치는 상기의 문제점을 해결할 뿐만 아니라 다음과 같은 장점을 갖고 있다.

- (i) 자유도 높은 출력 주파수의 선택으로 도전성 재료, 절연재료에 관계없이 피가열 물체에 부분가열 (표면 혹은 단면) 및 급속 가열이 가능하다.
- (ii) 고주파를 이용하므로 응답이 빠르며, 제어특성이 양호하여 가열 조건의 재현성이 있어 제품의 신뢰성 및 안정화를 향상 시킨다.
- (iii) 공진 현상을 이용하므로 코일도·고효율화를 이룩 할수 있다.
- (iv) 다양한 가열 작업 조건에 적용이 용이하여 Switch 한개로 즉시 기동·정지가 수행되므로 생산공정중의 열프로세서 자동화하기 쉽고, 생산성의 향상을 꾀할수 있다.
- (v) 스위칭 소자의 전류가 정현파상으로, 또는 전압이 정현파상으로 되기 때문에 EMI Noise 를 최소화 시킬수 있다. 한편 본 논문은 장치의 정상상태 및 과도 상태의 이론적 특성을 평가한 부분을 논문 "고주파 공진형 인버터의 설계에 관한 연구"에서 참조로 하여 주로 H/W 개발 즉, 시제품 제작 및 개발 시험을 통하여 장치의 속용성 및 신뢰성을 구현시킨 부분을 기술하고 있다.

## II. 시제품 설계 및 제작

### 1. 주회로 제작 및 특성

그림 2-1은 본 연구에서 개발한 전원장치의 전체 블록도를 나타내고 있다.

그 구성을 살펴보면 DC 소퍼부에서 들어온 전원은 HF 콘덴서 Cd로 필터링되며, S2, S3에 흐르게 된다. 이때 흐르는 전압과

전류는 Matching Transformer를 통하여 부하측에 전달되게 되어 피가열물체를 가열시키게 된다. 이때 회로의 Impedance는 피가열물체가 가열됨에 따라 현저히 변하게 되어 회로의 고유 주파수도 따라 변하게 된다. 따라서 부하 Tank 회로의 공진 주파수와 Switching 주파수를 같게 제어하기 위해 부하단에서 전압과 전류를 PT와 CT를 이용하여 Sensing되며, 이 측정된 값은 히스테리시스용 퍼레이터를 통하여 P.D에서 그 위상차를 항상 검출하고 Low Pass Filter 및 VCO에 의해 자동 주동이 되게 한다.

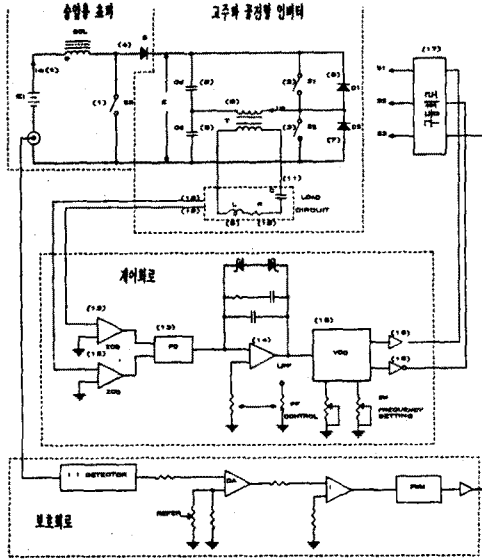


그림 2-1 시스템 전체 블록도

2. 제어회로와 보호회로 제작 및 특성

(1) PLL 동조회로를 이용한 제어회로

그림 2-2는 PLL (Phase Locked Loop)에 의해 회로 공진주파수 추종 제어 및 출력조정을 행하는 블록도이다. 제어회로는 고 주파 인버터를 회로의 공진 주파수와 동조되도록 하여 주파수 제어와 출력 제어의 양기능을 갖고 있다. Channel (I)은 공진 주파수 추종 제어계로서 출력 전압 Vo와 전류 Io를 PT 및 CT로 검출하여 Zero-Cross Comparator로 파형을 정형하여 정형된 신호를 Interface 시킨다. 정형된 신호를 위상비교기 (I)에 입력시키고 Vo와 Io의 위상차에 비례하여 전압을 적분기 (I)로 동작시켜 출력하고 VCO (I)에 입력된다. 따라서 입력된 신호는 공진주파수에 동조된 신호를 S1에 출력 시킨다. 본 제어회로에 사용한 위상비교기 (I) (MC 4046의 P.D II)의 출력은 3가지 상태로 되기 때문에 R-C 필터는 단순히 Low

Pass Filter로 작동되고 High Impedance로 일정 전압을 유지 시킨다.

그림 2-3은 PLL에 의한 공진주파수 제어계의 동작원리를 표시 하였고

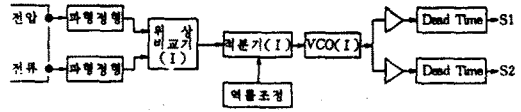
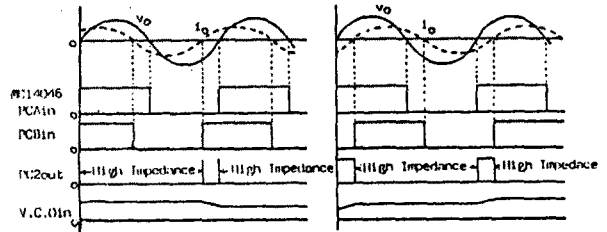


그림 2-2 PLL에 의한 공진주파수 추종제어 및 출력제어 블록도



(a) 용량성 부하

(b) 유도성 부하

그림 2-3 공진주파수 추종제어계의 동작원리도

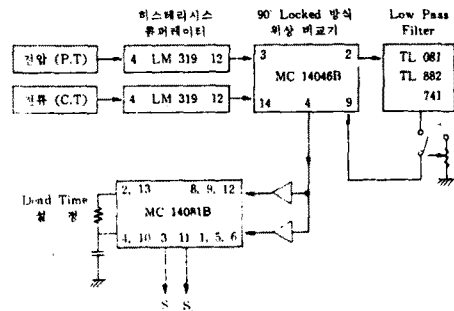
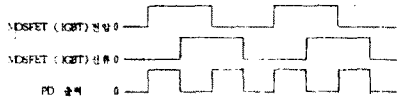


그림 2-4 PLL에 의한 공진주파수 추종제어 회로도 (90 Locked 방식)

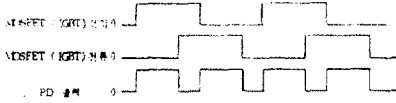
본 System에서는 Noise에 강한 90° Locked 방식으로 그림 2-4와 같이 설계하였다. PLL 회로에 있어서 0°, 90° Locked 방식이 있는데 자동제어는 그림 2-5에서 보는바와 같이 MOSFET (IGBT)에 걸리는 전압과 전류와의 위상차에 주목하여 양쪽의 위상차를 항상 검출하여 비교하는 것에 의해 자동추종을 실현 시킨다.

그림 2-6의 VCO 특성도에서 출력주파수가 높게되는 (b)점에서는 유도성 부하상태가 되는데 이때는 그림 2-5의 PD의 출력전압은 크게되나, VCO 전단에 있는 LFF는 반전기로 작용해 PD의 출력 전압이 증가하면 VCO에 입력되는 전압이 감소해 그 결과

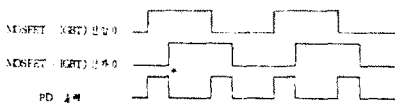
VCO의 출력주파수를 떨어뜨리게 되어 (a)점의 동조 상태로 끄  
고가므로 공진주파수 자동추종제어를 실현시킬수 있다.



(a) VCO 출력주파수 : 일정 (동조상태)



(b) VCO 출력주파수 : 감소 (유도성 부하상태)



(c) VCO 출력주파수 : 증가 (용량성 부하상태)

그림 2-5 PLL 90° Locked 제어방식의 원리도

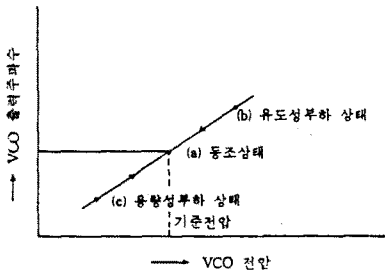
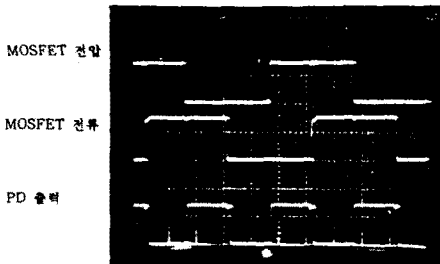


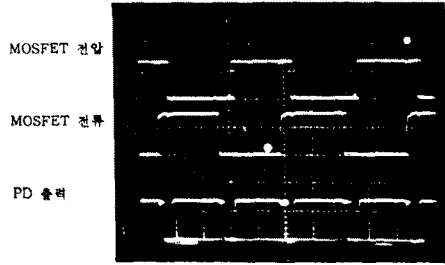
그림 2-6 VCO의 특성도

그림 2-7은 본 연구에서 채택한 회로 방식 (그림 2-4)으로 실험  
시킨 실제 파형이다. 앞서 언급한 바와같이 각 부하상태  
에 따른 PD 출력 VCO 출력 주파수가 변동하게 된다.



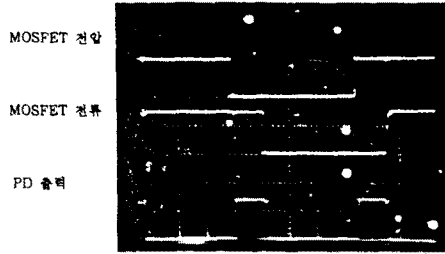
VCO 출력주파수 : 일정 (150kHz 일때)

(a) 동조상태 (10V/div, 1μsec/div)



VCO 출력주파수 : 감소 (200kHz 일때)

(b) 유도성 부하상태 (10V/div, 1μsec/div)



VCO 출력주파수 : 증가 (100kHz)

(c) 용량성 부하상태 (10V/div, 1μsec/div)

그림 2-7 PLL 90° Locked 제어방식을 이용한 실측파형

(2) 보호회로 제작 및 특성

가. 구동전원 및 주전원 전압 검출회로

그림 2-8은 본 개발장치에 있어서 기동시 또는 System에 이상  
상태가 발생 (예로 부하단락 및 과부하) 한 경우 System 운전  
개시·정지를 행하기 위한 Sequence를 나타내고 있으며 그림  
2-9 및 그림 2-10는 구동 전원 검출회로 및 주전원 전압 검출  
회로도이다.

본 System은 (i) Gate가 차단상태에 있을것 (ii) 전원전압이  
회망치에 달할것 (iii) 부하부에 이상이 없을 것을 만족하는 3  
가지 조건하에서 운전이 개시되며, 만약 3개의 조건이 만족하  
지 않을 경우는 Power Switch로서 있는 Thy가 ON 되지 않음과  
동시에 주 INV 회로의 Switching 소자인 MOSFET (IGBT)의  
Gate신호가 주입되지 않으므로 System은 정지상태로 되어진다.  
고주파 인버터가 유도 가열용 전원으로 사용하는 경우 피가열  
물체의 가열 진행 과정에서 시시각각 그 부하 파라메타 (R-L  
분)가 변동한다. 때문에 탭크 부하회로의 공진주파수와 출력  
주파수 (Switching 주파수) 가 깊게 되도록 제어를 하지 없으  
면 인버터의 동작영역이 변하여 불안정한 상태로 될뿐만 아니  
라 고효율화를 기대할 수 없기 때문에 PLL 응용 기술을 도입  
하여 주파수를 자동 동조 시킬 필요가 있다.

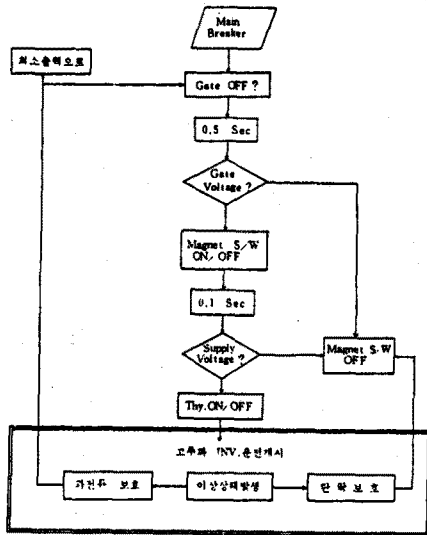


그림 2-8 계안 System의 운전 Sequence도

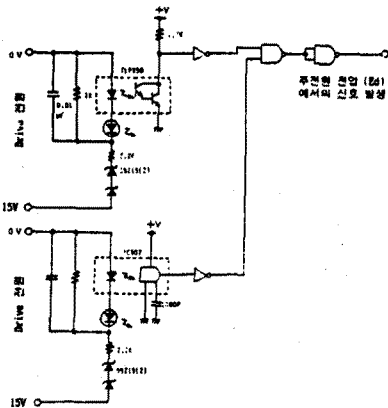


그림 2-9 Drive 전원 검출도

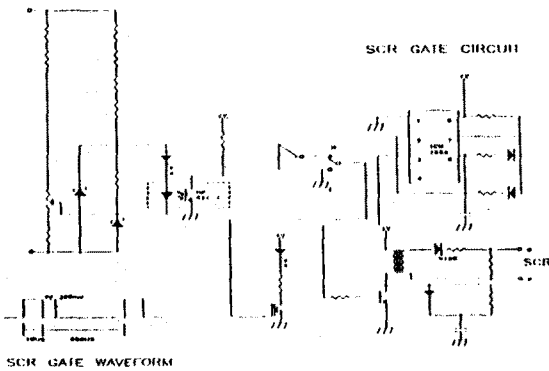


그림 2-10 주전원 전압 검출 회로도

나. 과전류 제한 제어회로

그림 2-11은 과전류 제한 제어회로이다. 과전류부터 MOSFET (IGBT)의 보호동작은 아래의 같다. 스위칭 전류 (MOSFET 전류)가 과전류 제한 제어회로의 전류설정치 (예를들면 MOSFET 전류의 2배)보다 크게 되었을때, D1이 도통하고, 콘덴서 C1이 충전하므로써 (b)점의 전위는 0 (V) 이  $i_{ab}$ 로 되어서 C2로 충전 전류가 흘러 충전을 계속한다. 그 결과 (c)점의 전위가 낮게 되어 D2가 도통해서 출력 조정 제어 회로에서 전류  $i_o$ 를 줄임으로써 MOSFET에는 설정 전류치보다 큰 전류가 흘러지 않도록 하여 과전류로부터 MOSFET를 보호 한다.

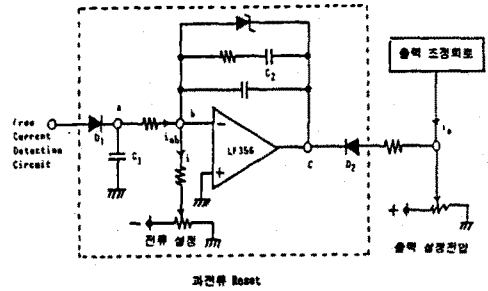


그림 2-11 과전류 제한 제어회로

다. 단락 보호회로

그림 2-12은 직류 전원 단락 및 부하 단락에 의한 단락 보호 회로의 블록도이다. 부하전류가 전류기준 설정치 (예를 들면 MOSFET 전류의 5배) 보다 클 경우 출력 전류 검출회로부터 단락전류 (정의 반파 혹은 부의 반파)를 검출하여 Zero Cross Comparator에 의해 파형을 정형하고 동시에 Zero Cross Comparator는 Wired OR로서 작동하여 전체 MOSFET에 차단 신호를 발생시켜 MOSFET 구동회로에 전달 시킨다. 이 결과 System은 운전 정지 상태로 되며 직류 전류 단락 및 부하단락에 스위칭 소자인 MOSFET를 보호하게된다.

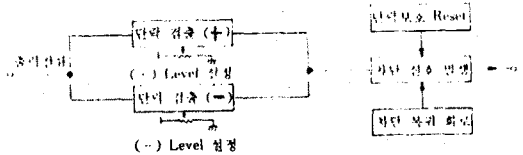


그림 2-12 단락 보호 회로 블록도

III. 실험 및 고찰

1. 각부 정상 동작 파형

$V_{ds} = 100 [V]$

$R$  (탄소봉) = 0.32 [ $\Omega$ ]

$C = 0.135 [\mu F]$

$L = 13.03 [\mu F]$

$f_r = 120 [KHz]$

즉,

Impedance 기준량 ( $Z_s = 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$ ) = 19.6488

무차원화 부하저항 ( $r = \frac{R}{Z_s}$ ) = 0.0163

회로 공진 주파수 ( $f_r = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$ ) = 120 [KHz]

무차원화 주파수 ( $u = \frac{f_o}{f_r}$ )

사진 3-1, 3-6까지는  $r = 0.0163$ 을 고정시키고  $\mu$ 를 변화 시켰을 경우 각부 정상파형을 나타내고 있으며 사진 3-7, 사진 3-8은  $V_{ds} = 200[V]$ 를 입력시켰을 때 공진상태의 전류 ( $I$ ), 전압 ( $V_L, V_c$ )파형을 보여주고 있다.

□  $r = 0.0163, \mu = 0.9$ 일때 실측파형

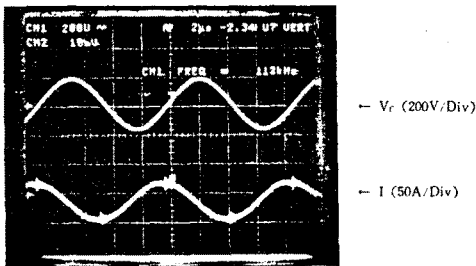


사진 3-1 Vc 및 I 파형

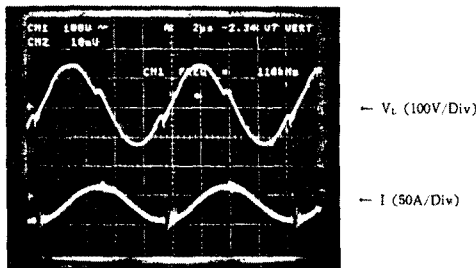


사진 3-2 VL 및 I 파형

□  $r = 0.0163, \mu = 1.0$ 일때 실측파형

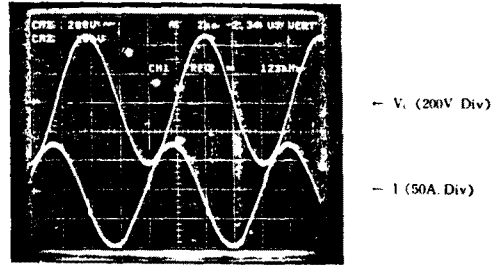


사진 3-3 Vc 및 I 파형

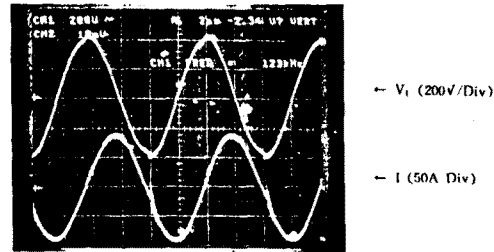


사진 3-4 VL 및 I 파형

□  $r = 0.0163, \mu = 1.1$ 일때 실측파형

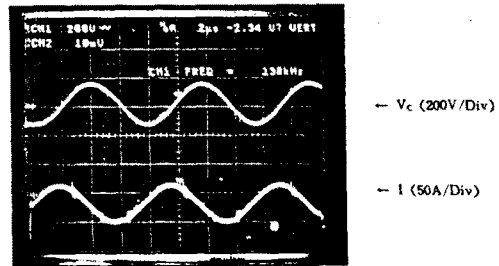


사진 3-5 Vc 및 I 파형

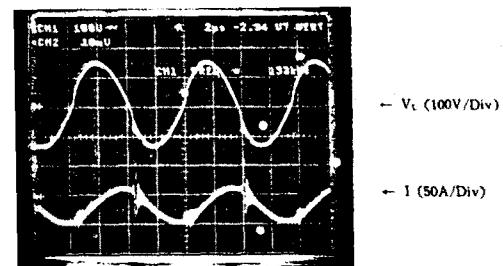
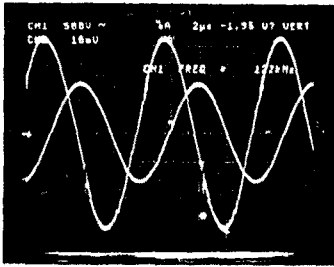


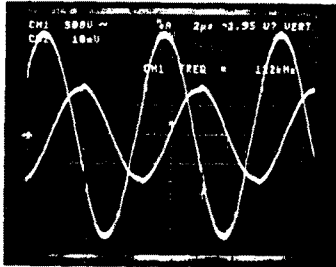
사진 3-6 VL 및 I 파형

□  $V_{ds} = 200[V]$ ,  $r = 0.0163$ ,  $\mu = 1$ 일때 실측 파형



- I (50A/Div)  
- Vc (500V/Div)

사진 3-7 Vc 및 I 파형



- I (50A/Div)  
- VL (500V/Div)

사진 3-8 VL 및 I 파형

IV. 결 론

본 연구는 각종 공업 분야에 널리 사용되고 있는 유도가열용 전원장치의 개발을 목적으로 하였으며 1차년도에서는 공업 전업용 고출력 고주파 전원 장치의 설계를 위한 특성 해석과 설계 자료를 도출하였으며, High Frequency Power Semiconductor (POWER, MOSFET, IGBT)의 고속 구동회로를 개발함으로써 안전 운전 동작 영역 확장 및 PLL 전자 응용 기술유 확보시켰다. 본 기술을 토대로 다음과 같은 연구 성과물 얻을 수 있다.

- (i) 100kHz~300kHz, 5KW 주전원 장치 제작
- (ii) 부하 Test용 Dummy Load 제작
- (iii) PLL 전자 응용 기술 도입으로 장치의 속응성 및 신뢰성 구축
- (iv) 자유도 높은 출력 주파수 선택으로 부분 및 급속 가열 실현
- (v) 회로 Topology에 L, C 공진특성을 도입함으로써 장치의 소형·경량화 및 고효율화 실현
- (vi) EMI Noise 극소화 실현

향후 본 개발 장치의 실용화를 위해서는 다음과 같은 연구가 계속 수행되어야 하며

- (i) 부하 정합 연구
- (ii) 내구성 및 신뢰성 향상 연구
- (iii) 국내 규격 위원회 구성
- (iv) 수요자 요구에 따른 시장 조사
- (v) 장치의 대응망화

제품의 고부가가치화 및 응용확대화 (FA·OA 및 전자 통신용 전원, 증소용량, 고주파 UPS, 전자조리용 HF INV, 초고속 전동기 구동용 전원, 위성 System용 전원등)에 관한 연구가 지속적으로 행여져야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. K.Rieschmuller: "A New Base Drive Method for Ultra fast High-Voltage Switching With Darlington", IEEE, PCI (1984)
2. D.H.Kim: "전력용 반도체 소자의 Drive 기술", 전자공학회지 Vol 14, No. 6, pp. 1~12, (1987. 12)
3. Edwis S. Oxner: "Power FETS and Their Applications", INC, N. J07632 (1982)
4. D.W.Yoo: "Hybrid 및 고주파 인버터의 특성 해석", 전기·전자 학술대회 논문집, pp113~116, (1987. 7)
5. N.M.Vietson: "Analysis of Current-Fed Type High-Frequency Inverter Using a Single Reverse-Conducting Thyristor": Vol. IECI-26, No. 1, FEB. 1975.
6. B.R.Pelly: "Applying International Rectifier Power MOSFETS", IR Application Note AN-930
7. W.E.Frank: Solid State RF Generator for Induction Heating Applications", IAS82, pp.939~944, (1982)
8. D.H.Kim: "A New Ultrasonic Power Generator Using Instantaneous Current Result Control Based Inverter and its Control System", '87 한국자동제어 학술회의, Vol. 1, No.2, 1987
9. R.Thompson: "An Audio-Frequency High-Power Generator Employing Silicon Controlled Rectifiers", IEE, No. 3889E, May 1962
10. D.W.TENN and L.Hobson: "Design of Matching Circuitry for 100 KHz MOSFET Induction Heating Power Supply", IEEE, Industrial Electronics, Vol. IE-34, No. 2, May 1987
11. Ralph E. Locher: "The Advent of High Current ASCR' S", PCI '81 PROCEEDINGS, pp. 196~207.
12. Bill Roehr: "High Voltage MOSFET and Bipolar Power Switches", Factory Electronics, 1983. pp25~40.
13. D.H Kim: "The static-of-the art developments of High-frequency inverter using new power semiconductor devices", International Conference on P.E and VS Drives. 1984. pp419~425.

□ 본 논문은 한국전기연구소와 상용전장엔지니어링 Co. 가 과학기술처 특정연구과제로 수행한 것이며 현재 대한민국 특허청에 발명특허 (출원번호 91-9250)를 출원중이오니 양지하시기 바랍니다.