

고주파 유도가열용 인버터의 출력제어를 위한 구동신호의 위상 천이에 관한 연구

이봉섭^{1*}, 최신희¹

A Study on Phase Shift of Driving Signal in order to Output Control of Inverter for High Frequency Induction Heating

Bong-Seob Lee^{1*} and Shin-Hyeong Choi¹

요약 본 논문에서는 고주파 유도가열용 인버터를 제안하고 인버터의 출력제어에 대해 논하고 있다. 인버터의 출력제어 방법은 스위칭 소자에 인가되는 구동신호의 위상 천이에 따라 출력을 제어하고 있으며, 제안회로의 동작원리와 특성평가는 정규화 파라미터를 도입하여 기술하였다. 또한 회로설계에 필요한 출력특성은 수치해석에 의해 평가 자료를 도출하였고 이론결과와 실험결과를 비교하기 위하여 실험 장치를 제작하였으며 특성평가의 정당성을 입증하였다.

Abstract This paper proposes high frequency inverter for induction heating and discusses output control of high frequency inverter. Output control method of inverter is controlled by phase shift of switching devices applied to driving signal and the principle and a characteristic estimates of proposed circuit described on normal parameters. Also output characteristics for circuit design presented to numeric analysis and experimental equipment is made to compare theoretical result with an experimental result and an established characteristic estimate.

Key Words : Inverter, High Frequency, Driving Signal

1. 서론

최근에 신형 전력용 반도체 소자의 개발로 전력변환장치는 소형 경량화, 고효율화, 고속 스위칭화가 가능하여 그 응용범위도 확대되고 있다. 전력용 반도체 스위칭소자를 이용한 전력전자기술은 고성능 소자의 개발과 고효율성 에너지화의 요구에 부응한 전력변환 장치의 기술 발전도 최근 수십 년간 눈부신 발전을 하고 있다[1,2].

전력전자 기술 중 고주파 응용기술은 유도가열 전원장치, 고주파 용접기, 초음파 발전기 등 산업분야를 비롯하여 전자조리기, 전자식 안정기 등의 가전용에 이르기까지 장래가 기대되는 기술로 주목받고 있으며, 전력변환 시스템에 신형전력용 스위칭소자를 도입하여 종래에 없는 새

로운 회로방식의 개발은 물론, 종래의 회로구성에 새로운 제어기능을 부여하여 운전동작 영역도 가능케 하였다 [3,4]. 그러나 스위칭소자를 고속으로 구동시킬 경우 턴 온·오프에 따른 스위칭 소자의 전압과 전류스트레스의 증가, 그리고 스위칭 회로내의 표류 에너지를 처리하기 위한 실장 기술 등이 문제되어 최근에는 공진 특성을 이용한 ZCS(Zero current switching), ZVS(Zero voltage switching) 및 소프트 스위칭에 관한 연구가 주목을 받고 있다. 공진회로 방식은 스위치의 턴 온·오프 시에 인가되는 전압 또는 스위치에 흐르는 전류파형이 정현파 형태로 나타나므로 스위칭 손실을 저감시키고 고주파화를 실현시킬 수 있어서 공진형 전력변환장치에 관한 연구가 진행되고 있다[5,6].

본 논문에서는 상술한 기술적 배경으로 종래의 고주파 공진 인버터 회로에 인버터의 고주파 출력을 선형적으로 인버터 내부에서 제어가 가능한 스위칭 방법을 제안하고

¹강원대학교 삼척캠퍼스 전기제어공학부

*교신저자 : 이봉섭(mirine@kangwon.ac.kr)

있다. 스위칭 동작에 따른 특성평가를 수행하였으며, 실험을 통하여 이론치와 비교·검토하여 이론해석의 정당성을 입증하고 있다.

2. 전류형 고주파 인버터

그림 1은 종래의 풀-브릿지 전류형 고주파 인버터 회로를 나타낸다. 탱크회로는 유도가열용으로 사용하기 위하여 등가회로로 워크 코일을 L , 역률 보상용 콘덴서 C 와 피가열 물체 저항 R 로 구성하였으며 공진은 L 과 C 에 의해서 동작한다. 다이오드 (D_1, D_2, D_3, D_4)는 역전압 저지용이며 스위칭 소자로 파워 MOSFET가 사용된다. 직류 리액터 L_d 는 전원 E로부터 일정한 전류를 부하로 공급하기 위한 것이며 일반적으로 큰 값을 선정하여 일정한 정전류를 근사적으로 실현하고 있다.

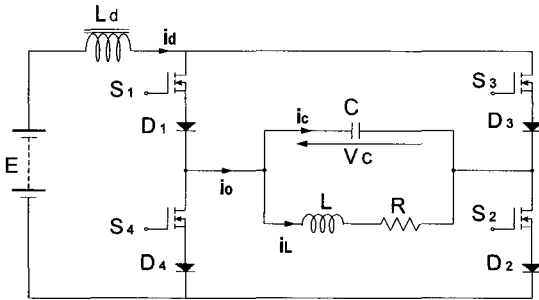


그림 1. 풀-브릿지 전류형 고주파 인버터

2.1 스위칭 방식

종래에는 인버터의 출력을 제어하기 위하여 입력전원을 직접 제어하는 방법과 PFM(pulse frequency modulation)방법으로 사용하였다. 그리고 스위치의 구동 방식도 그림 2와 같이 50%의 듀티비로서 상호 대각으로

스위치를 턴 온·오프 시키고 있다. 입력전원 제어는 별도로 입력전원을 제어하기 위한 회로가 부가 되어야 하며, PFM방식은 주파수 조건에 따라 용량성 또는 유도성으로 동작이 벗어날 경우 스위치의 과도한 스트레스를 줄 수 있다는 단점이 있다.

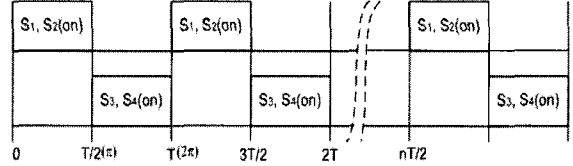


그림 2. 종래의 스위칭 구동 방식

그러나, 공진조건에서 고주파 출력을 제어하는 방법으로 스위칭소자에 인가되는 구동신호를 그림 3에서와 같이 게이트 신호 (S_1, S_3)를 고정시키고 신호 (S_2, S_4)의 위상 천이 (ϕ)에 의해 선형적으로 제어할 수 있는 방법을 제안하고자 한다. 그림에서 위상 천이는 $0 \sim 180^\circ (\pi)$ 까지 제어할 수 있으며 0° 에서는 그림 2와 같은 종래의 방법으로 구동된다. 따라서 위상 천이에 따라 탱크회로에 주입되는 전원의 입력시간이 조절되어 출력이 제어되며 ϕ 가 180° 에서는 상하 스위치의 아암 단락이 되어 탱크회로에 정상적인 전원이 입력되지 않으며 출력은 거의 나오지 않게 된다.

2.2 제안회로의 해석

제안한 회로의 해석을 간략하게 하기 위해 회로의 모든 소자 및 회로의 조건은 이상적이며 손실은 무시한다. 표 1은 회로의 수치해석을 위한 해석의 범용성을 부여하기 위하여 정규화파라메타를 도입하여 나타내었다.

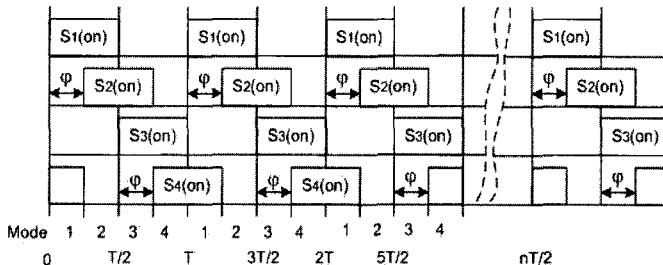


그림 3. 제안하는 위상 천이에 의한 구동 방식

표 1. 정규화 파라메타

| Parameters | Reference value | Normalized value |
|------------|---------------------------------------|---|
| Time | $T = 1/f_o$ | $Z = t/T$ |
| Frequency | $f_r = 1/2\pi\sqrt{LC}$ | $\mu = f_o/f_r$ |
| Impedance | $Z_s = 2\sqrt{L/C}$ | $\lambda = \frac{R}{Z_s} = \frac{R}{2}\sqrt{\frac{C}{L}}$ |
| Voltage | $E_s = E$ | $E^*(z) = E(t)/E_s$ |
| Current | $I_s = E/Z_s$ | $i^*(z) = i(t)/I_s$ |
| Power | $P_s = E_s \cdot I_s$ | $P^*(z) = P(t)/P_s$ |
| Inductance | $L_s = L$ | $a_n = L_d/L_s$ |
| 기 타 | f_o : 인버터의 동작주파수 T : 인버터의 동작주기 | |

그림 3의 구동방식에 따라 회로의 동작모드를 나타내면 4개의 모드로 표 2와 같다.

표 2. 회로의 동작모드

| Mode \ Switch | S ₁ | S ₂ | S ₃ | S ₄ |
|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 모드 1 | on | off | off | on |
| 모드 2 | on | on | off | off |
| 모드 3 | off | on | on | off |
| 모드 4 | off | off | on | on |

그림 3의 구동 방식에 따라 회로의 동작을 나타내면 그림 4와 같다.

<모드 1>

스위치 S₁, S₄가 동시에 턴-온하고 S₂, S₃는 턴-오프하여 탱크회로에는 입력전류가 유입되지 않으며 상하 스위치 아암 단락 루프회로로 이루어진다.

<모드 2>

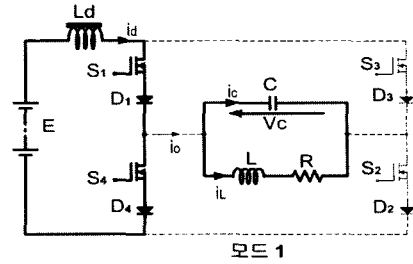
스위치 S₁, S₂가 상호 대각으로 도통하여 위상 천이만큼 탱크회로에 전류가 유입되며 L, C 공진이 일어난다.

<모드 3>

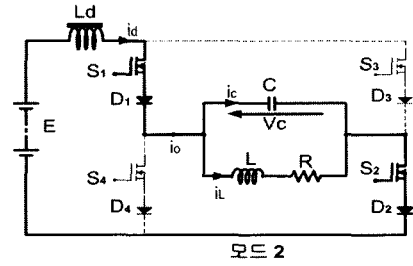
스위치 S₂, S₃가 동시에 턴-온하여 상하 스위치 아암 단락 루프회로로 탱크회로에 전류가 입력되지 않는다.

<모드 4>

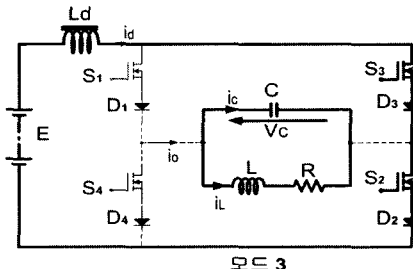
다시 스위치 S₃, S₄가 대각으로 도통하여 위상 천이만큼 탱크회로에 전류를 입력시켜 L, C 공진을 일으킨다.



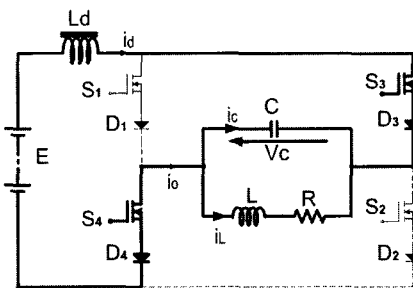
모드 1



모드 2



모드 3



모드 4

그림 4. 회로의 동작모드

각 모드에 대한 회로의 상태방정식과 출력방정식을 표 1의 정규화 파라메타를 도입하여 나타내면 다음 식과 같다.

$$\frac{dx}{dz} = A \cdot x + B \cdot u$$

$$Y = C \cdot x \tag{1}$$

여기서, $x = [i_d^* \ i_L^* \ V_c^*]^T$, $u = [1 \ 0 \ 0]^T$ 그리고 각 모드별 회로 상태방정식의 A, B, C는 다음과 같다.

<모드 1>

$$A1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{4\pi\lambda}{\mu} & \frac{4\pi}{\mu} \\ 0 & -\frac{\pi}{\mu} & 0 \end{bmatrix} \quad B1 = \begin{bmatrix} \frac{4\pi}{\mu \cdot a_n} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$C1 = [0 \quad 0 \quad 1]$$

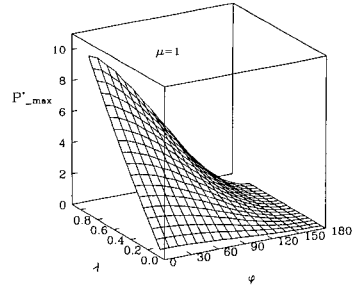


그림 6. 출력전력 특성

그림 7은 부하전류의 특성으로 λ 에 관계없이 위상 천이에 따라 선형적으로 제어됨을 볼 수 있다.

<모드 2>

$$A2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{4\pi}{\mu \cdot a_n} \\ 0 & -\frac{4\pi\lambda}{\mu} & \frac{4\pi}{\mu} \\ 0 & -\frac{\pi}{\mu} & 0 \end{bmatrix} \quad B2 = B1$$

$C2 = C1$

<모드 3>

$A3 = A1 \quad B3 = B1 \quad C3 = C1$

<모드 4>

$A4 = A2 \quad B4 = B1 \quad C4 = C1$

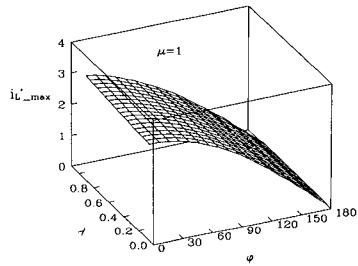


그림 7. 부하전류의 특성

2.3 제안회로의 특성평가

제안 회로의 상태방정식으로 수치 해석을 위하여 Runge-Kutta 수치해석법에 의해 수치 계산을 하였으며, 그림 5의 수치해석 순서에 의해 시뮬레이션을 수행하여 회로의 특성을 도출하였다.

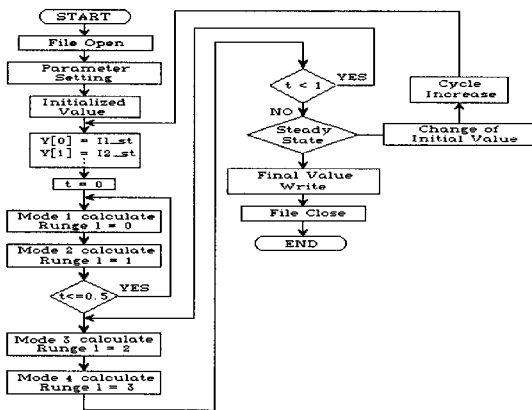


그림 5. 회로해석 흐름도

그림 6은 인버터 회로를 공진조건($f_o = f_r$)하에서 위상 천이에 따라 출력전력 특성을 나타낸다. 구동신호의 위상 천이에 따라 선형적으로 출력이 제어됨을 볼 수 있다.

3. 실험결과 및 검토

이론해석의 특성을 실험결과와 비교하기 위하여 실험 장치를 제작하였다. 그림 8은 인버터회로의 블록도를 나타낸다. 시스템의 동작은 부하단의 출력파형을 검출하여 파형을 정형한 후 VCO의 출력신호와 비교하여 타임딜레이 회로를 거쳐 위상 검출기의 기준 신호를 만든다. 위상 검출기로부터 출력되는 신호는 LPF를 거쳐 VCO의 제어 신호로 사용하며, 회로 공진시 90° 의 위상차를 갖도록 되어있다.

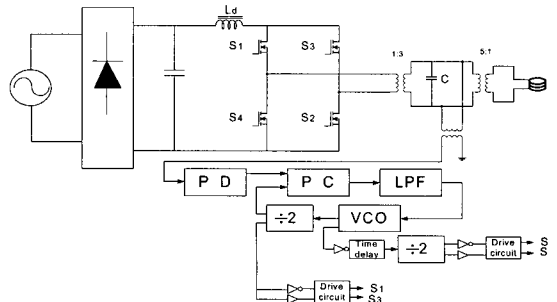


그림 8. 시스템 블록도

실험에서 사용된 파라메타 및 사용한 소자는 표 3과 같다.

표 3. 회로 파라메타

| | |
|---------------|-------------------|
| Input Voltage | Vdc=30[V] |
| 스위칭 주파수 | 46[kHz] |
| Mosfet | San Rex FBA50BA50 |
| Diode | IR 40HF L60S02 |
| Ld | 5.6[mH] |
| L | 0.72[μ H] |
| C | 14.1[μ F] |
| R | 0.05[Ω] |

그림 9는 본 실험 장치에서 사용한 위상천이 제어용 PLL회로이다.

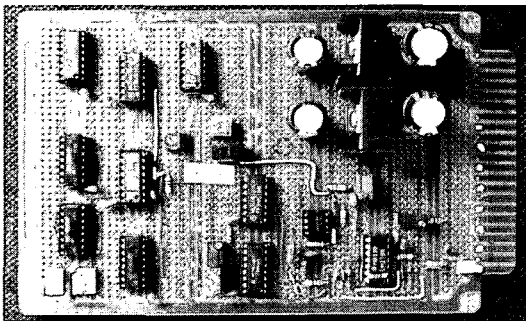
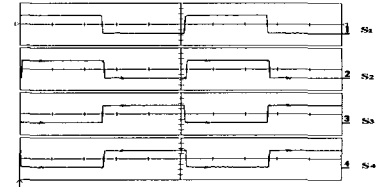
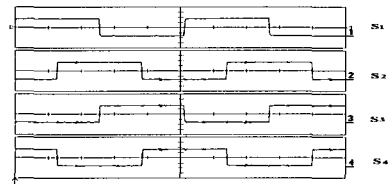


그림 9. 위상 천이용 PLL 제어회로

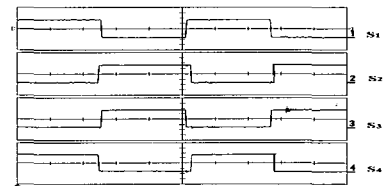
위상천이 제어용 PLL회로를 사용하여 스위칭소자의 게이트 신호를 위상 천이에 따라 측정된 파형으로서 위상 천이에 따라 1/2의 듀티비를 갖고 위상이 제어됨을 볼 수 있다.



$\phi = 0^\circ$

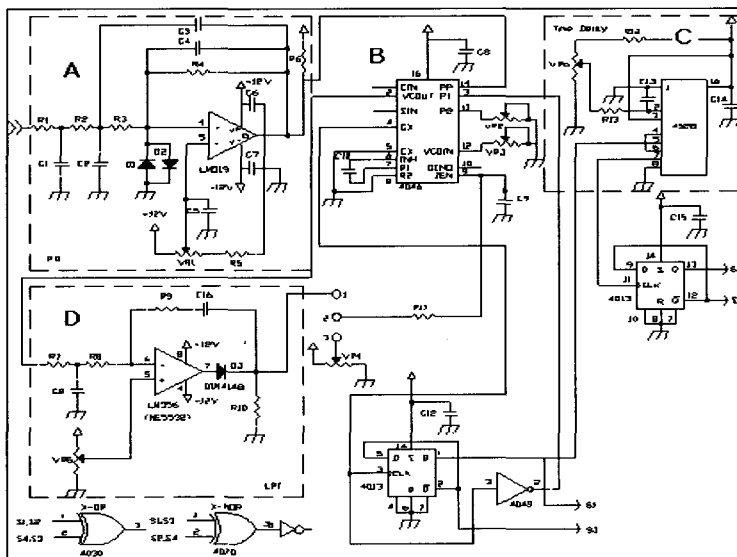


$\phi = 90^\circ$



$\phi = 180^\circ$

그림 10. 스위칭 소자의 게이트 신호



A:파형 정형부 (P.D), B: VCO발진부 C: 타임 딜레이(T.D), D: LPF

그림 11은 인버터 회로에서 위상 천이에 따라 탱크회로에 주입되는 입력전류의 파형을 나타낸다. 위상이 180° 일 때는 스위치의 아암 단락으로 탱크회로에 입력이 거의 나타나지 않는다.

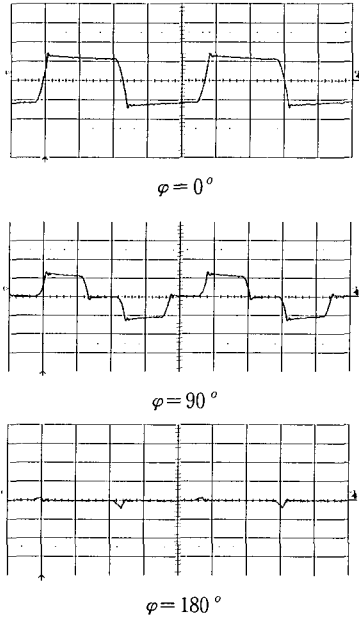


그림 11. 탱크회로의 입력전류

그림 12는 시뮬레이션 파형과 실험파형을 나타낸다. 그림에서 시뮬레이션 파형과 거의 일치하며 위상 천이에 따라 선형적으로 제어됨을 알 수 있다.

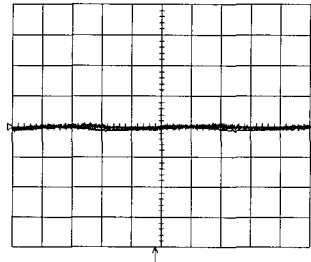
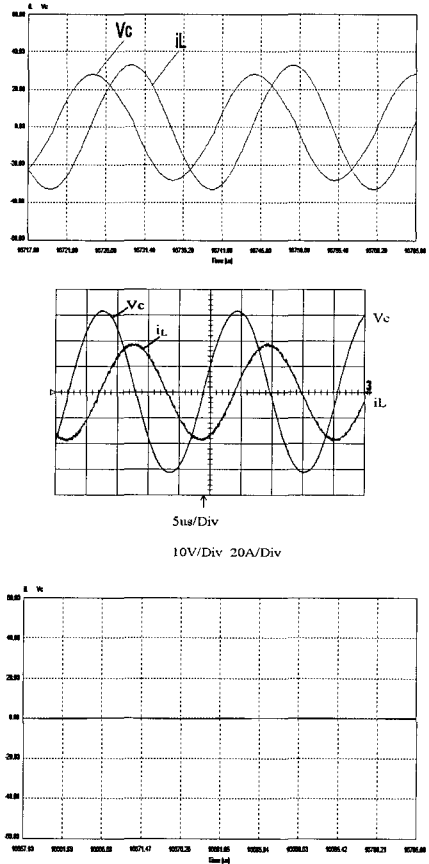
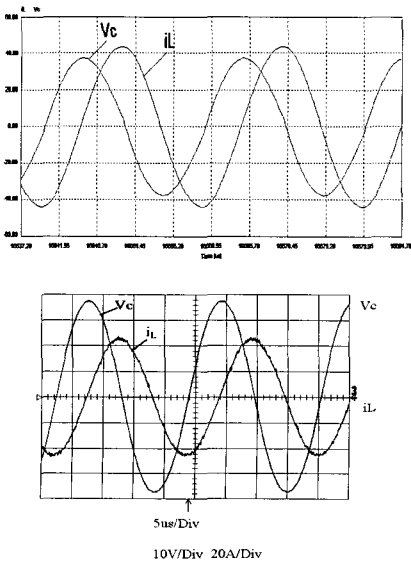


그림 12. 각부의 파형

4. 결론

본 논문에서는 종래의 풀-브릿지 전류형 고주파 인버터회로에 기존의 스위칭 구동방식에서 출력전력을 제어할 수 있는 새로운 위상 천이 제어형 스위칭 구동방식을 제안하고 비교 검토하였다. 그리고 실험장치를 제작하여 공진조건하에서 주파수를 변화시키지 않고 고주파 인버터로 동작하며 위상 천이에 따라 출력이 선형적으로 제

어딴을 볼 수 있었으며 출력제어가 더 용이함을 알 수 있었다. 앞으로 고주파 출력제어를 필요로 하는 전원장치 분야 등에 응용되리라 사료된다.

참고문헌

- [1] Patrick R. Palmer and Muhammad S. Abu Khaizaran, "The Series connection of IGBTs in a Current Source Inverter", PESC, conference Proceedings, vol. 1, pp. 170 ~ 175, 2001.
- [2] J. M. Espl, "Features Design of the Voltage-Fed L-LC Resonant Inverter for Induction Heating", IEEE/PESC, Vol. 2, pp. 1126 ~ 1131, 1999.
- [3] Hideki Sadakata, Mutsuo Nakaoka, "Development of Induction Heated Hot Water Producer using Soft Switching PWM High Frequency Inverter", IEEE/PCC'2002, Vol. 1, pp.452 ~ 455, 2002.
- [4] H. Oriwara, L. Gamage and M. Nakaoka, "Quasi resonant soft switching PWM voltage fed high frequency inverter using SIT for induction heating applications", IEEE Proce. Electr. Power Appl., Vol.148, No.5, pp.385 ~ 392, September 2001.
- [5] Huijie Yu, Xudong Huang, Jih-sheng, "A Novel Load Adaptive Zero Voltage Switching Utilizing Diode Reverse Recovery Current for Soft-Switching Choppers and Inverters", IEEE/PESC, Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 146 ~ 151, 2001.
- [6] J. Ribas, J. M. Alonso, E. L. Corominas, J. Cardesin, F. Rodriguez, J. Garcia-Garcia, M. Rico-Secades, A. J. Calleja, "Analysis of lamp-Ballast Interaction Using the Multi-Frequency-Averaging Technique", PESC, Conference Proceedings, Vol. 1, pp. 176 ~ 181, 2001.

이 봉 섭(Bong-Seob Lee)

[정회원]



- 1991년 2월 : 영남대학교 전기공학과 (공학사)
- 1993년 2월 : 영남대학교 전기공학과 (공학석사)
- 1996년 8월 : 영남대학교 전기공학과 (공학박사)
- 1996년 3월 ~ 현재 : 강원대학교 삼척캠퍼스 전기제어공학부 부교수

<관심분야>
전기응용 및 제어

최 신 형(Shin-Hyeong Choi)

[종신회원]



- 1993년 2월 : 울산대학교 전자계산학과 (공학사)
- 1995년 2월 : 경남대학교 전자계산학과 (공학석사)
- 2002년 8월 : 경남대학교 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2003년 9월 ~ 현재 : 강원대학교 삼척캠퍼스 전기제어공학부 조교수

<관심분야>
테스터 및 품질평가, 임베디드 시스템