

전력용 반도체소자(IGBT)의 모델링에 의한 열적특성 시뮬레이션

Modeling and Thermal Characteristic Simulation of Power Semiconductor Device(IGBT)

서 영 수*

Seo, Young-Soo

백 동 현**

Baek, Dong-Hyun

조 문 택***

Cho, Moon-Taek

Abstract

A recently developed electro-thermal simulation methodology is used to analyze the behavior of a PWM(Pulse-Width-Modulated) voltage source inverter which uses IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) as the switching devices. In the electro-thermal network simulation methodology, the simulator solves for the temperature distribution within the power semiconductor devices(IGBT electro-thermal model), control logic circuitry, the IGBT gate drivers, the thermal network component models for the power silicon chips, package, and heat sinks as well as the current and voltage within the electrical network. The thermal network describes the flow of heat from the chip surface through the package and heat sink and thus determines the evolution of the chip surface temperature used by the power semiconductor device models. The thermal component model for the device silicon chip, packages, and heat sink are developed by discretizing the nonlinear heat diffusion equation and are represented in component form so that the thermal component models for various package and heat sink can be readily connected to on another to form the thermal network.

I. 서 론

IGBT(Insulated Gate Bipolar Transistor) 처

- * 명지대학교 전기공학과 교수
- ** 경원전문대학 소방안전관리과 교수
- *** 대원전문대학 전기과 전임강사

럼 스위칭 속도가 빠른 전력용 반도체 소자의 보다 높은 전력요구는 소자에서 많은 양의 열을 발산하게 된다. 전력용 반도체소자는 전기적인 특성에서 소자의 열이 효과적으로 제거되지 않는다면 소자는 파괴되고 접화원이 될 수 있다. 또한 시스템의 전기적인 수행에 따른 열의 발생은 소자사이

의 열적 요소에 의해 제한할 수 있다. 그리고 온도는 반도체 소자의 전기적인 동작을 결정하는데 있어서 중요한 파라미터이다. 그러나, 온도의 영향은 소자들이 소자내에서 소비된 전력(자기 열)과 인접한 반도체 소자에서 소비된 전력(열 결합)에 의해 발생하는 열로 인해 일반적으로 사용자가 정의한 온도 조건을 사용하여 정의할 수는 없다. 따라서 전력변환 시스템의 시뮬레이션은 시스템들의 효과적인 동작을 위해 컴퓨터를 이용한 설계가 필수적이며 전열 시뮬레이션은 전기시스템의 효과적인 설계를 위해 열처리 시스템의 설계가 가능해야 한다. 그러므로, 전형적인 전력변환 시스템 설계시 고려해야 할 것은 제어 시스템 해석, 디지털 회로 시뮬레이션, 전력용 반도체 소자의 상호작용과 외부회로를 가진 자계소자 그리고 반도체 소자에서 소비된 전력의 열적처리를 포함해야 한다. 그러나 SPICE(Simulation Program with Intergrated Circuit emphasis)¹⁾처럼 전형적인 회로 시뮬레이션 프로그램은 집적회로 해석을 위해 개발되었지만 전열 시스템을 효과적으로 해석할 수 없기 때문에 다양한 시뮬레이션 도구는 전력시스템 해석, 열적 회로망 해석, 물리적인 근거를 둔 반도체와 자계 소자 분석처럼 여러가지 전기 시스템의 특정한 해석이 가능해야 한다.

회로 시뮬레이션 프로그램은 하나의 시뮬레이션 환경에서 완전하게 전력변환 시스템을 시뮬레이션하기 위한 성능을 가져야 한다. 따라서, 본 논문에서는 전기적인 시스템과 열적 시스템 설계의 상호작용에 대해 IGBT를 사용한 PWM 전압형 인버터의 전열해석을 위해 회로 시뮬레이션 프로그램인 Saber시뮬레이터²⁾를 이용하여 전력변환 제어 시스템, 디지털 회로, 전력용 반도체 소자와 자계소자를 시뮬레이터내에 내장된 MAST 언어²⁾를 이용하여 모델링하고 구성시스템에 대해 시뮬레이션하여 그 적용성과 온도상승이 화재발생 요인이 될 수 있는지에 대해 논하고자 한다.

II. 전열 회로망 시뮬레이션

1. 전열 시뮬레이션 방법

그림 1은 전열 회로망의 다이어그램으로 전기

적 요소가 전력용 반도체 소자와 전열 모델을 통해 결합된 것을 나타낸 것이다. 전력용 반도체 소자에 대한 전열모델의 전기 단자는 전기적인 회로망과 연결되었고 열적단자는 열적 요소에 연결되어 시스템 설계자가 다른 열적소자들과 상호교환되어 쉽게 다른 형태를 해석하기 위한 열적성분의 상호접속으로 나타냈다. 전력용 모듈에 대한 열적 회로망 모델과 방열판은 다양한 단자와 인접한 반도체 소자사이의 열적결합에 관한 것을 포함하며, 그림 1에서 전력용 반도체 소자의 전열모델은 그림 2와 같은 등가회로로 나타낼 수 있다.

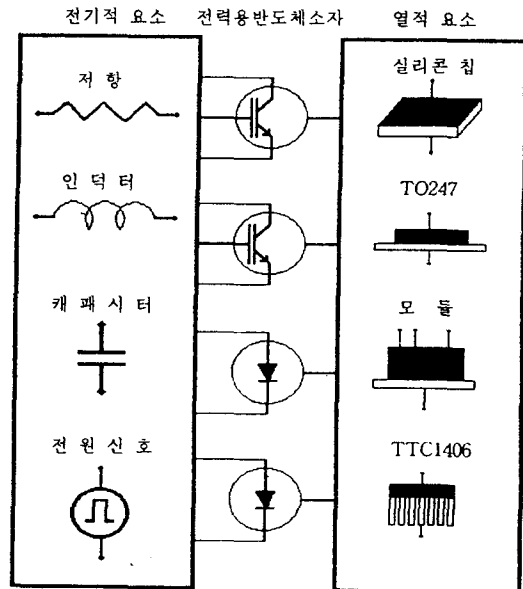


그림 1. 전력용 반도체 소자와 전열모델로 구성된 전열 회로망의 다이어그램.

그림 2는 전열 IGBT 모델 방정식에 의한 아날로그 회로의 등가모델로 원으로 나타낸 것은 전력 소비 성분이다. 식(1)~식(6)은 소자의 전기적인 절점과 내부 전기적인 절점사이의 전류성분이고, 전기적인 특성을 계산하기 위해 사용된 모델함수는 온도에 의해 좌우되는 특성을 사용하여 계산되며, 실리콘에서 온도에 의해 좌우되는 특성은 식(7)~식(16)로 나타낼 수 있고, IGBT 파라미터의 온도에 좌우되는 파라미터는 식(17)~식(20)로 표현할 수 있다^{3,4)}.

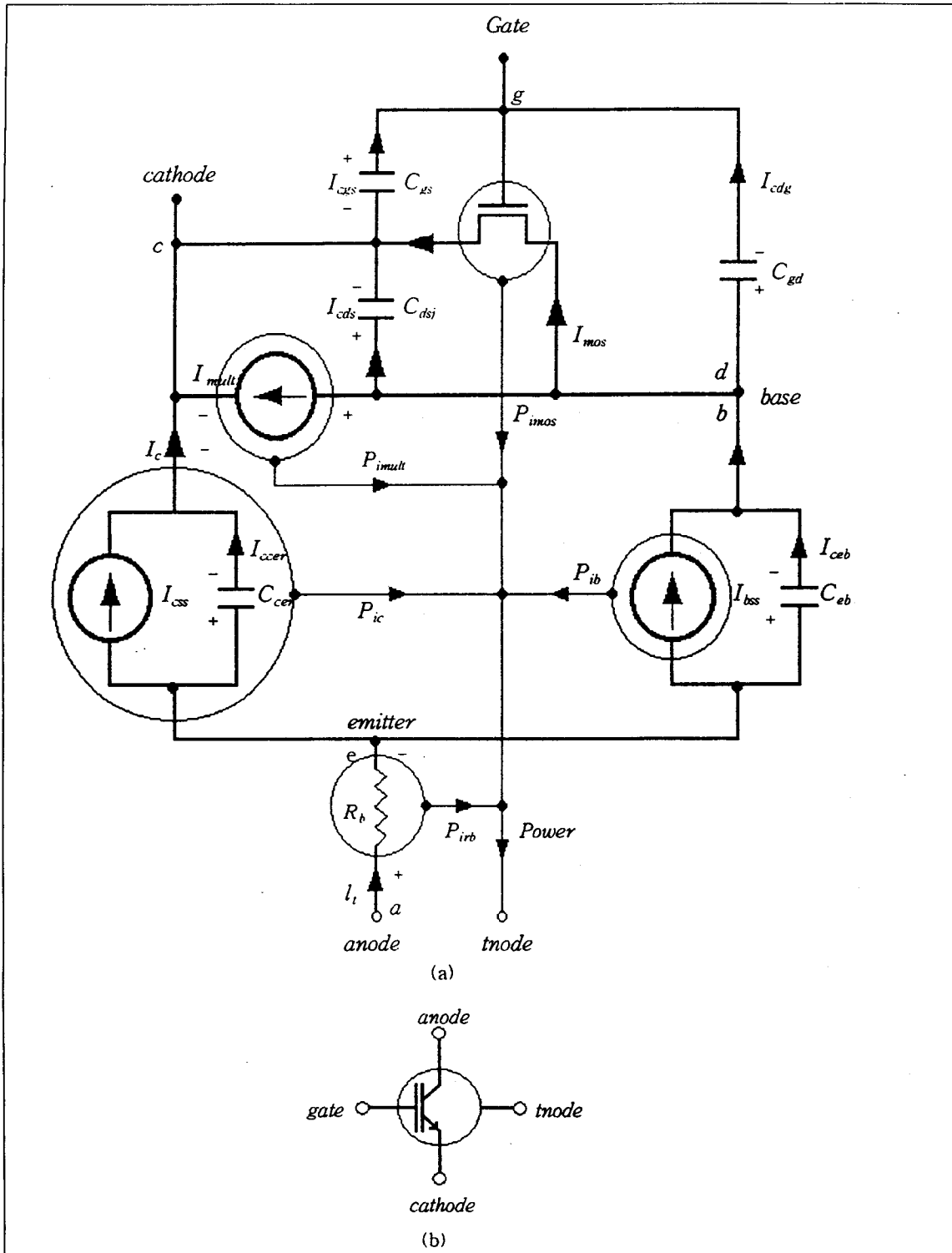


그림 2 전력용 반도체 소자의 전열회로 등가회로.

$$i_{gs} = \frac{d}{dt} Q_{gs} \quad (1)$$

$$i_{dg} = C_{gd} \frac{dV_{dg}}{dt} \quad (2)$$

$$i_{dc} = I_{mos} + I_{mult} + \frac{dQ_{ds}}{dt} \quad (3)$$

$$i_{ec} = I_{csc} + C_{cer} \frac{dV_{ec}}{dt} \quad (4)$$

$$i_{ed} = I_{bss} \quad (5)$$

$$i_{ac} = \frac{V_{ae}}{R_b} \quad (6)$$

$$\mu(T_j) = 1500 \cdot \left(\frac{300}{T_j}\right)^{2.5} \quad (7)$$

$$\mu_p(T_j) = 450 \cdot \left(\frac{300}{T_j}\right)^{2.5} \quad (8)$$

$$D_n(T_j) = \mu_n \cdot \frac{kT_j}{q} \quad (9)$$

$$D_p(T_j) = \mu_p \cdot \frac{kT_j}{q} \quad (10)$$

$$n_i(T_j) = \frac{3.88 \times 10^{16} \cdot (T_j)^{1.5}}{e^{\frac{7000}{T_j}}} \quad (11)$$

$$v_{nsat}(T_j) = 10^7 \cdot \left(\frac{300}{T_j}\right)^{0.87} \quad (12)$$

$$v_{psat}(T_j) = 8.37 \times 10^6 \cdot \left(\frac{300}{T_j}\right)^{0.52} \quad (13)$$

$$\alpha_1(T_j) = 1.04 \times 10^{21} \cdot \left(\frac{T_j}{300}\right)^{1.5} \quad (14)$$

$$\alpha_2(T_j) = 7.45 \times 10^{13} \cdot \left(\frac{T_j}{300}\right)^2 \quad (15)$$

$$BV_k = 5.34 \times 10^{13} \cdot \left(\frac{T_j}{300}\right)^{0.35} \quad (16)$$

$$\tau_{HL} = \tau_{ILO} \cdot \left(\frac{T_j}{T_0}\right)^{\tau_{mi}} \quad (17)$$

$$I_{sne} = \frac{I_{sne0} \cdot \left(\frac{T_j}{T_0}\right)^{i_{mi}}}{e^{\frac{14000}{T_j} \cdot \left(\frac{1}{T_j} - \frac{1}{T_0}\right)}} \quad (18)$$

$$V_T(T_j) = V_{T0} + V_T \cdot (T_j - T_0) \quad (19)$$

$$K_p = K_{p0} \cdot \left(\frac{T_0}{T_j}\right)^{K_s} \quad (20)$$

그림 3은 전력용 반도체 소자와 실리콘 칩, TO247 패키지와 TTC1406 방열판과 같은 열적 소자 모델을 사용한 간단한 회로도이다⁵⁾.

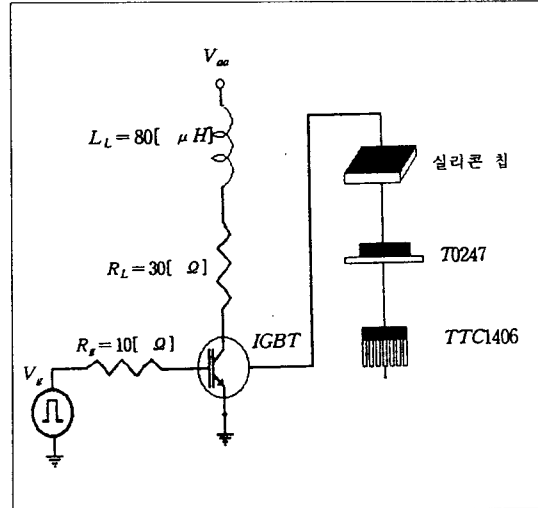


그림 3. 전열회로망.

2. 전열 반도체 모델

그림 4는 전열 반도체 소자모델의 다이어그램으로 전기적인 회로망과 열적 회로망의 상호작용을 나타낸 것이다. 이 모델은 실리콘의 온도에 의해 좌우되는 모델 파라미터를 계산하기 위해 순시적인 소자온도(실리콘 칩 표면 T_j 에서의 온도)를 사용하며, 온도에 의해 좌우되는 파라미터 값은 순시적으로 소비된 전력과 전기적 특성을 서술하기 위해 물리적인 이론에 근거를 둔 전력용 반도체 소자^{5,6)}에 의해 사용된다. 소비된 전력은 소자 단자로 이용된 전력 성분으로 소비되고 나머지는 내부 파라미터로 변화하기 때문에 전류의 내부 성분으로부터 계산되며 전기적인 모델에 의해 계산된 소비된 전력은 열적단자를 통한 실리콘 칩 열적 모델의 표면으로 열을 발산한다.

실리콘의 물리적인 특성에 대해 온도에 좌우되는 요소에 대한 표현과 온도에 좌우되는 모델 파라미터에 대한 표현은 전력용 반도체에 대한 것에서 정의했다. 실리콘에서 온도에 좌우되는 특성은 잘 알려졌고⁷⁾, 온도에 좌우되는 모델 파라미터는 모델 파라미터와 온도의 추출된 값을 사용함으로써 얻을 수 있다.

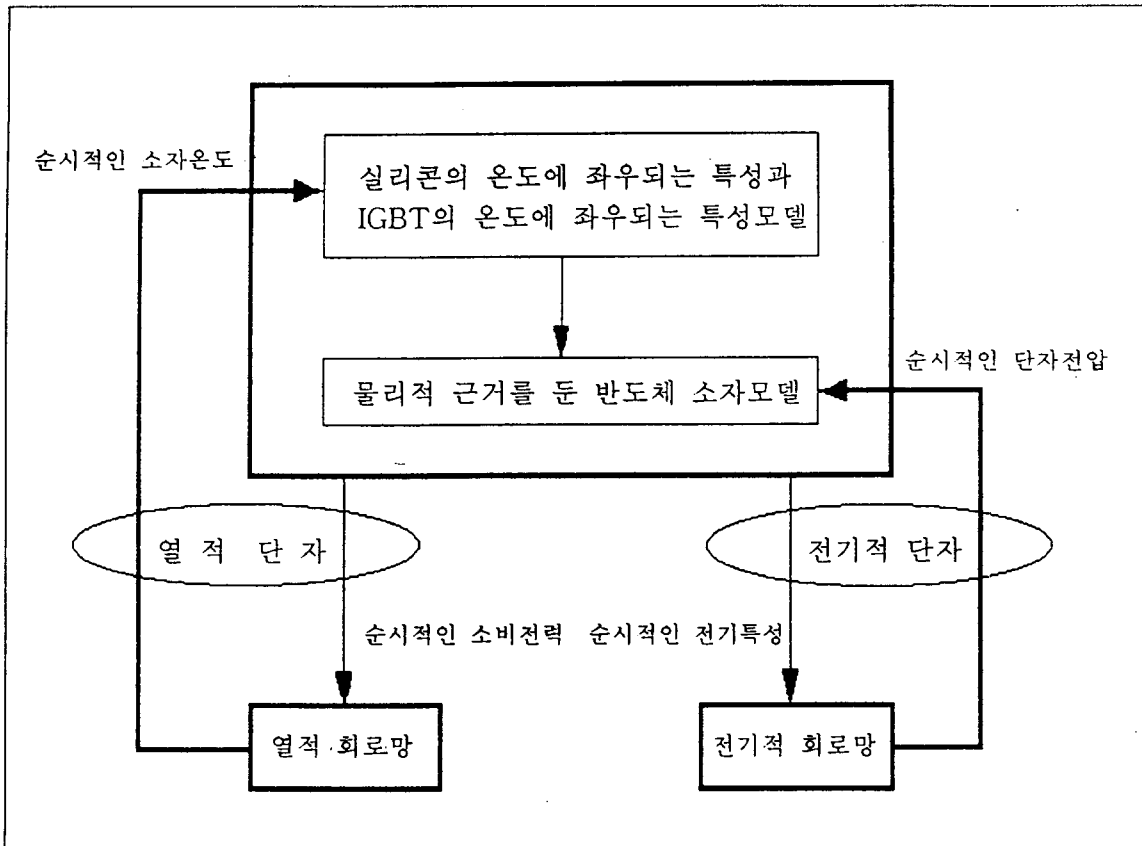


그림 4. 전열 반도체 소자모델의 구조 다이어그램.

전열 반도체 모델은 시뮬레이터 시스템 변수로 열적 단자로 흐르는 전력의 성분과 전기적인 절점 사이에 흐르는 성분의 표현에 의해 Saber 회로 시뮬레이터로 설계하였으며, 시뮬레이터 시스템 변수는 전기적인 절점에 걸리는 전압과 열적 절점에 걸리는 온도로 설정했다. 시뮬레이터에서 각각의 전기적인 절점에 대한 전류성분의 합은 키르히호프의 전류법칙에 따라 0으로 되고, 열적 절점에 대한 전력성분의 합은 에너지 보존의 법칙에 의해 0으로 될 때까지 시스템 변수의 반복에 의해 시스템의 전열 방정식이 해석된다.

Ⅲ. PWM인버터에 대한 전열 회로망과 전열 해석

1. 전열 회로망

높은 에너지 효율을 발생시키는 전력변환회로,

이동제어 분야⁸⁾에서 폭넓게 사용되는 PWM 전압형 인버터의 설계는 인버터 토폴로지, 제어시스템, 논리회로와 반도체 소자의 상호작용, 전동기 해석과 다른 부하 소자와의 열적 처리시스템의 설계를 위한 해석을 포함하여야 한다.

그림 5는 PWM 인버터 시뮬레이션에 사용된 기본적인 전열 회로망으로 해석 방법은 시스템 분석을 위한 대표적인 것으로써 모든 인버터 회로에 대해 적용할 수 있다.

1-1. 전력용 반도체 소자 모델링

그림 5(a)의 PWM인버터에서 IGBT는 역병렬로 접속된 전력용 다이오드((mur1560)를 가진 스위칭 소자로서 이용되므로, MOSFET나 GTO 처럼 다른 전력용 반도체소자에 대한 모델로 대치할 수 있다. IGBT의 모델은 소비된 전력과 관련된 온도 상승과 마찬가지로 소자내에서 예측된 스위칭 손실이 가능한 물리적인 근거를 둔 모델이

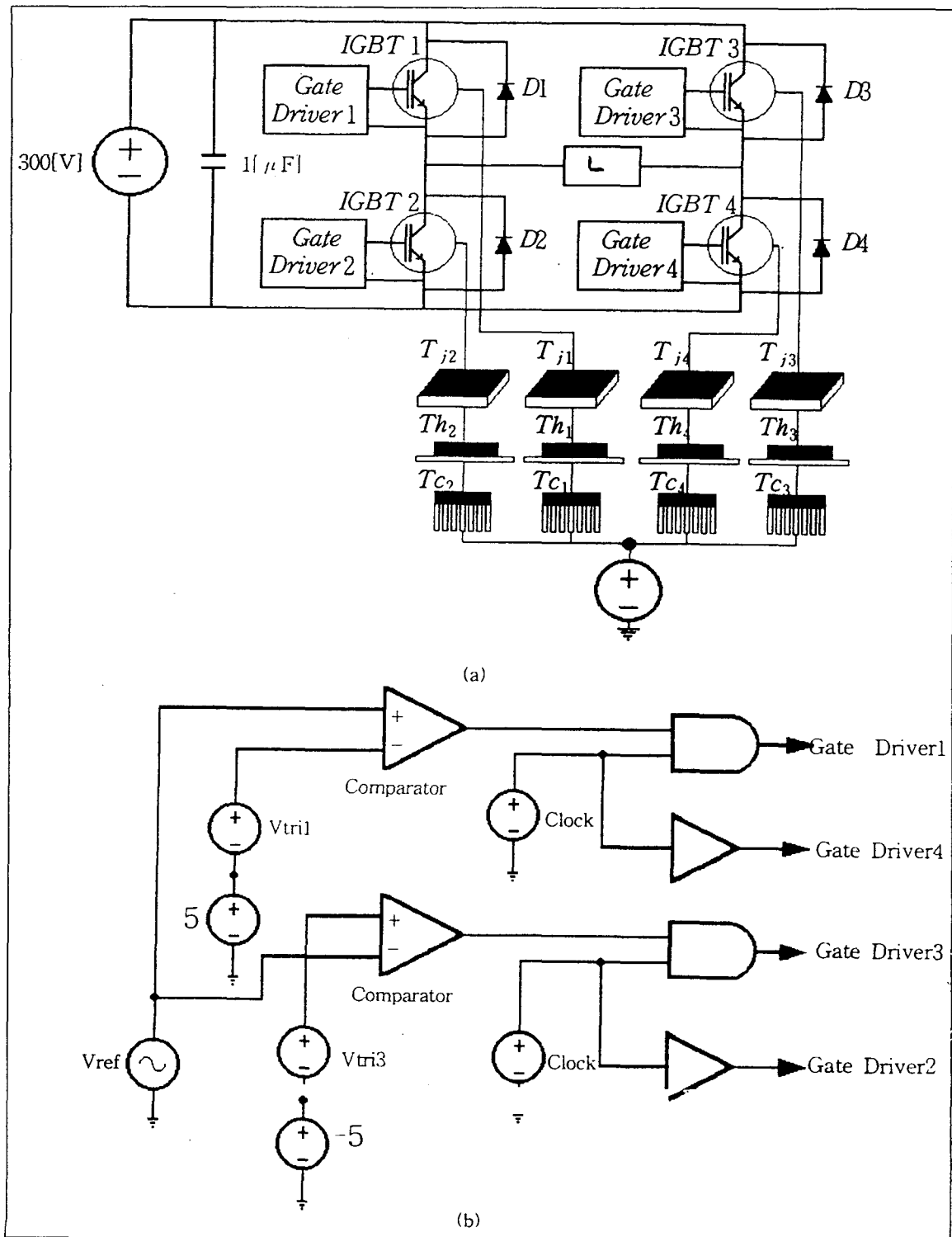


그림 5. PWM 인버터의 전열회로망.

다. 이것은 설계하려는 제어회로나 인버터 동작에서의 대용량 시스템을 시뮬레이션할 때 유용하다.

1-2. 기계와 마그네틱

Saber 전동기 모델 라이브러리는 직류 전동기, 교류 유도 전동기, 농형 전동기, 브리시리스 전동기와 스테핑 전동기와 같은 일반적인 전동기 모델을 여러가지 포함하고 있어서 이러한 모델들을 사용할 수 있으나, 전기적이고 기계적인 전체 시스템의 상호관계를 해석하기 위해 그림 5의 전동기에 나타난 부하는 직렬저항과 인덕터로써 구성된 간단한 모델로 구성했다.

1-3. 열적 회로망 모델링

그림 5에서 각각의 IGBT에 대한 열적 회로망은 실리콘 칩, TO247 패키지, TTC1406 방열판에 대한 열적 소자 모델의 상호 연결로 구성된다. 이러한 소자 모델은 열적 소자가 실제로 사용하기 위해 전력소비의 전체 범위에 대해 각 소자의 정적이고 동적인 열적 임피던스로 설명할 수 있다. 열적 회로망 소자 모델을 사용한 시스템 설계는 열적 회로망내에서 열적 단자의 연결점의 간단한 변화에 의해 다른 열적 회로망 토폴로지의 영향을 해석할 수 있다. 일례로 그림 5에서 회로망의 동작은 같은 방열판 상에 설치된 IGBT와 전력용 다이오드 사이에 열적결합을 포함하고, 같은 시스템의 동작을 비교할 수 있지만 각각의 전력용 반도체 소자는 방열판과 분리되고 해석하게 된다.

2. 전열해석

그림 5에서 PWM 인버터의 전체적인 수행은 열적요소과 물리적 근거를 둔 전력용 반도체소자 모델을 사용하여 모델링한 다음 IGBT의 전열방향을 해석하였다.

2-1. 전기적인 동작

회로의 동작을 설명하기 위해 IGBT 게이트 드라이버에 대한 입력 신호의 공칭 주파수는 그림 5(a)와 같은 사인-삼각파를 사용하여 변화한다.

60[Hz] 인버터 기준파 신호(그림 5(b)에서 16.7ms와 25ms사이)의 정전압 위상기간동안 IGBT1의 게이트 제어신호는 IGBT4가 온을 유지하는 동안 900[Hz] 삼각파 주파수에서 온과 오프로 스위칭된다. 60[Hz] 기준 사인파의 부전압 기간동안 인버터 동작은 브리지의 반대위상이 온

과 오프로 스위칭되는 것을 제외하고 정전압 위상 동안은 유사하다. IGBT1과 IGBT3에 대한 공칭 싸이클의 정현파 변화는 정현파 기준신호와 삼각파형의 크기를 비교한 게이트 논리 모델을 사용하여 결정된 기준 정현파의 값이 +쪽 삼각파의 값보다 클 때 IGBT1의 게이트 신호는 온으로 스위칭되고, -쪽의 IGBT1 게이트 드라이버 신호는 오프된다.

PWM 인버터는 20[KHz]의 범위에서 스위칭 주파수로 동작하며, 고려해야될 열의 양은 전동기 전류에 대한 온-상태 손실과 20[KHz] 소자 스위칭 주파수에 대해 발생된 스위칭 손실로 야기되는 IGBT에서 소비된다.

그림 7과 그림 8은 20[KHz] PWM 인버터에 대한 것으로 그림 7(a)는 IGBT1에 흐르는 전류, 그림 7(b)는 부하전류를 시뮬레이션했고, 그림 8(a)은 IGBT1에 대한 실리콘 칩 표면(T_{cs}), 칩-패키지 인터페이스(T_{ci})와 패키지-방열판 인터페이스(T_{cp})에서 온도파형을 나타낸 것이다.

2-2. 열적 회로망의 반응

그림 10(b)의 온도파형으로 부터, 실리콘 칩의 열적 반응은 패키지 히터(T_{cs})에서 온도가 20[KHz] 싸이클 동안 변화하지 않기 때문에 20[KHz] 스위칭 싸이클 소자동안 IGBT 온도변화를 기준으로 하여(385°K~405°K) 실리콘 칩과 TO247 패키지의 열적반응은 패키지 케이스(T_{cp})에서 온도가 변화되지 않기 때문에 60[Hz] 정현파 출력(355°K~385°K)의 1주기동안 소자온도변화로 결정되나, 전기적인 회로망의 비교적 높은 주파수에 대해 방열판 내의 온도는 지속적으로 변화되지 않는다.

3-3. 전열 상호 작용

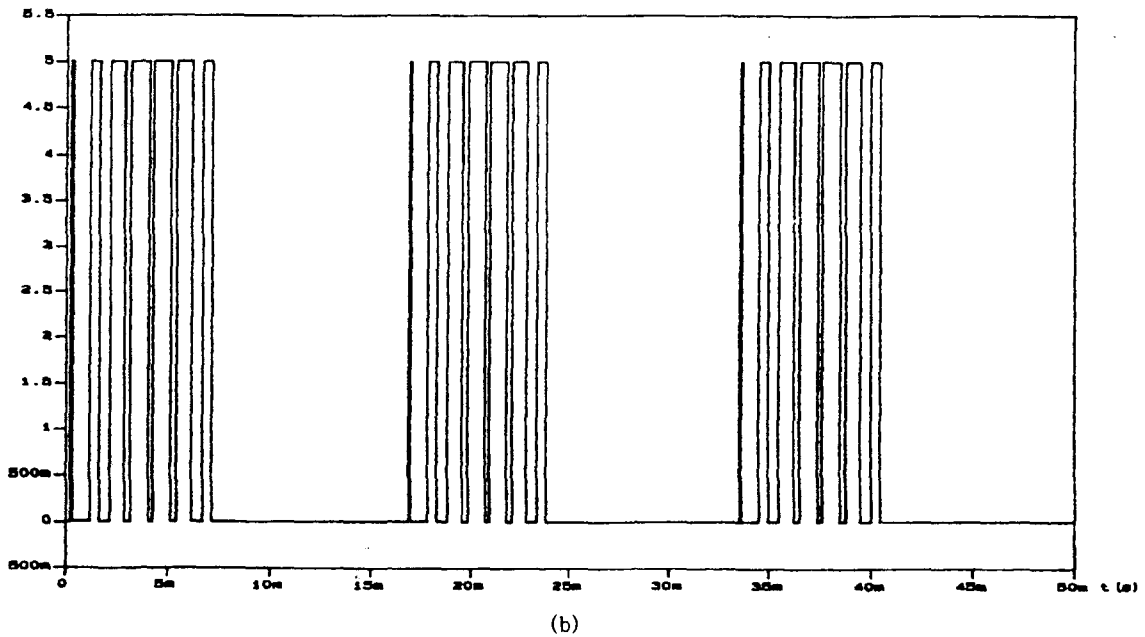
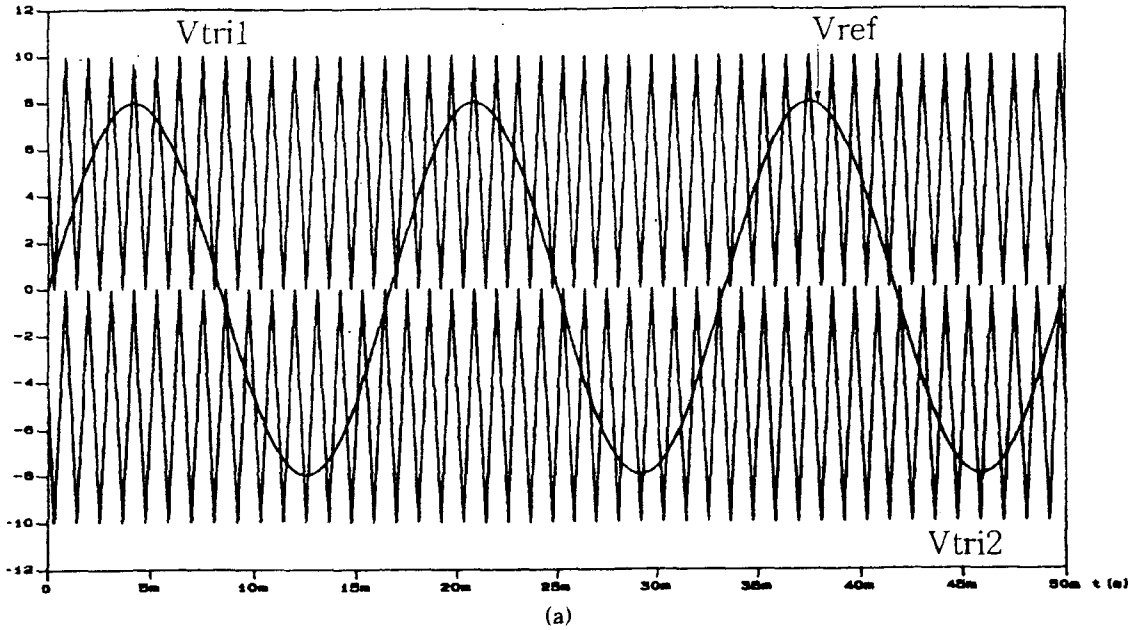
그림 10에 나타난 정상상태 열적반응에 대해 패키지 방열판 인터페이스(T_{cp})에서 온도는 300°K, 주위온도이상의 51°K에서 결정된다. IGBT의 전기적인 특성들은 온도에 따라 변화하기 때문에 평균소비전력은 온도상승에 따라 변화된다. 그림 8에 대한 온도의 초기조건을 결정하기 위해 본 논문에서는 다음과 같은 5단계의 반복적인 과정을 사용했다.

(1) 인버터의 전열시뮬레이션은 60[Hz] 싸이

- 클 이상에서 수행한다.
- (2) 평균소비전력은 완전한 60[Hz] 이상에서 소비된 전력의 합을 계산하기 위해 Saber 시뮬레이터에서 제공하는 WaveCalc™ 파형 계산기를 사용한다.
 - (3) 평균 전력의 계산된 값은 전기적인 회로망이 없는 그림 4의 열적 회로망과 일치하는

전력원으로 사용하였다.

- (4) 직류해석은 각 소자에서 계산한 평균 소비 전력의 평균 정상상태 온도를 결정하기 위한 열적회로망에 대해 수행한다.
- (5) 평균 정상상태 온도는 1 단계에서 다른 전열 시뮬레이션에 대한 초기조건으로 사용한다.



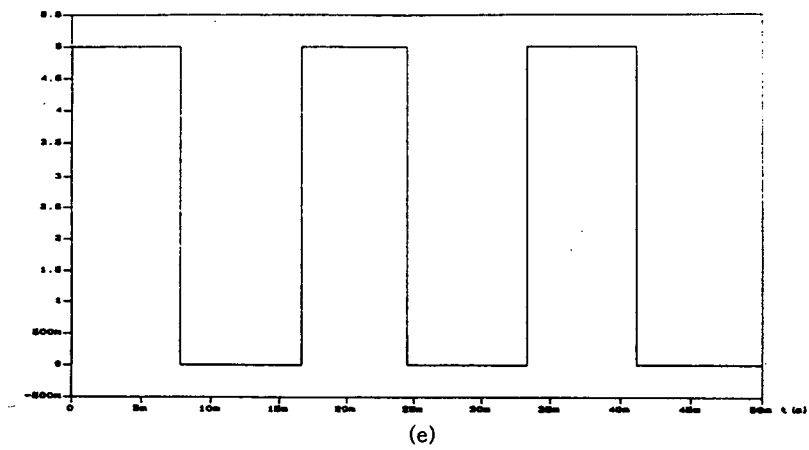
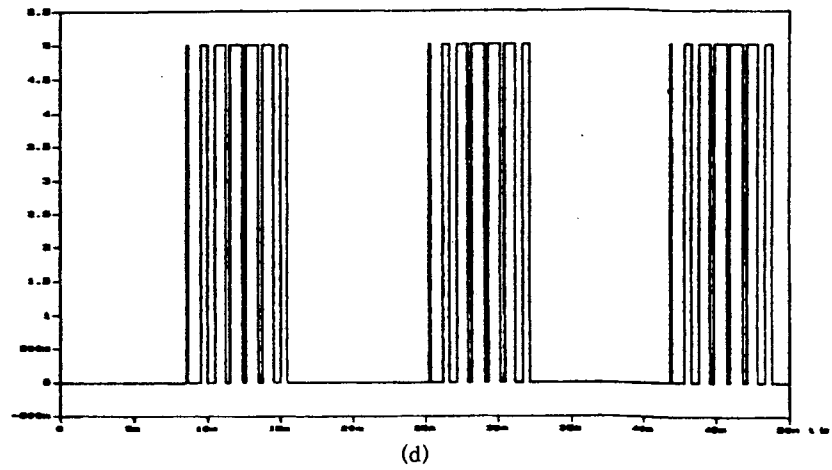
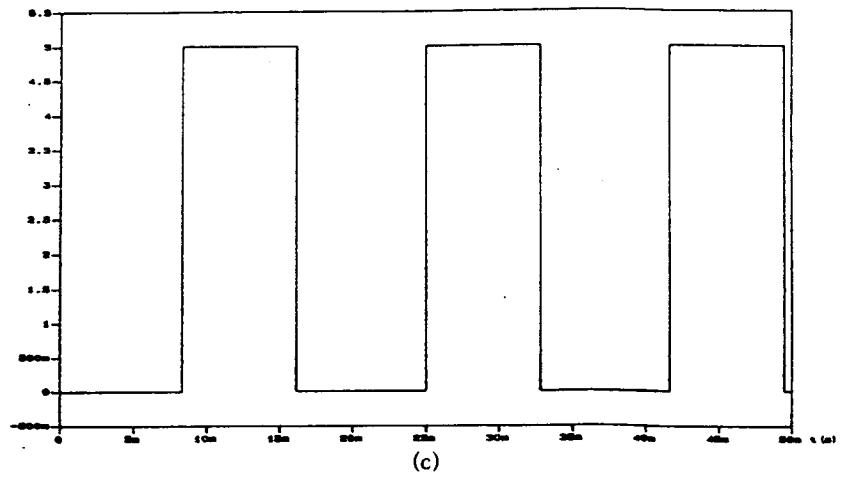
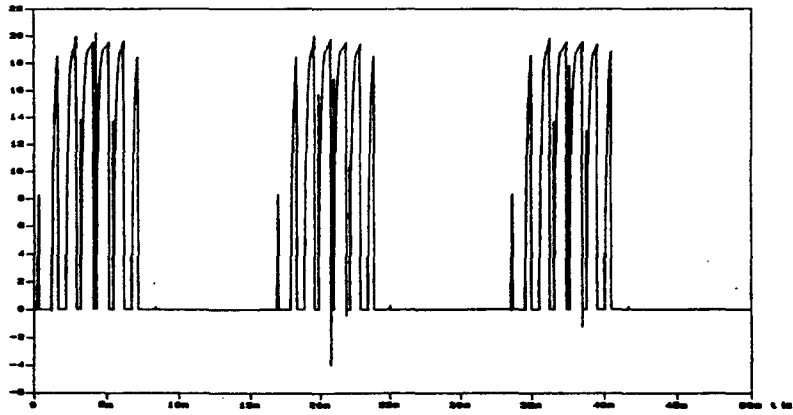
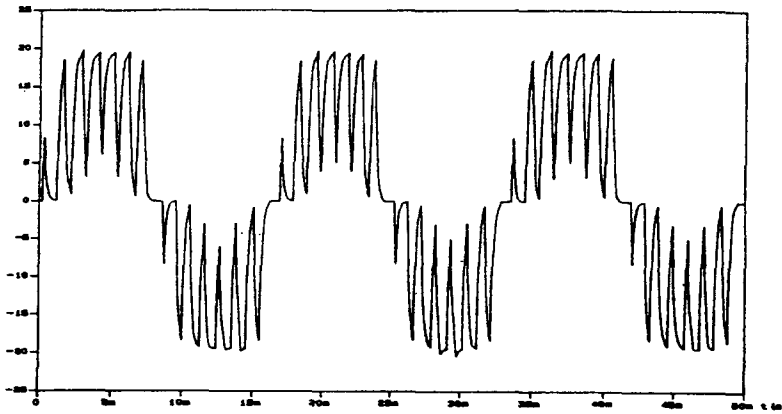


그림 6. 900[Hz] 스위칭 주파수에 대한 그림 4의 진열회로망 시뮬레이션 파형.

- (a) 기준파(V_{ref})-삼각파(V_{tri1} , V_{tri2}) 제어신호
- (b) 게이트 드라이버 1의 게이트 신호
- (c) 게이트 드라이버 2의 게이트 신호
- (d) 게이트 드라이버 3의 게이트 신호
- (e) 게이트 드라이버 4의 게이트 신호



(a)



(b)

그림 7. 900[Hz] 스위칭 주파수에 대한 PWM 인버터 전류.

(a) IGBT에 흐르는 전류

(b) 부하전류

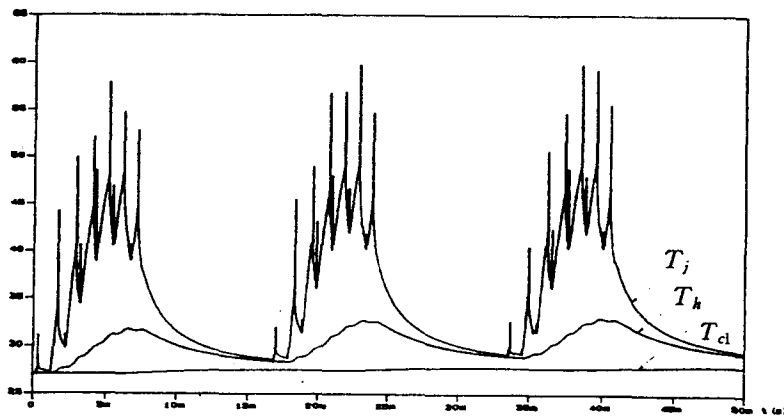


그림 8. 900[Hz] 스위칭 주파수에 IGBT의 실리콘 칩(T_j), 칩-패키지 T0247(T_h), 방열판 TTC1406(T_c) 표면 온도특성 시뮬레이션 파형.

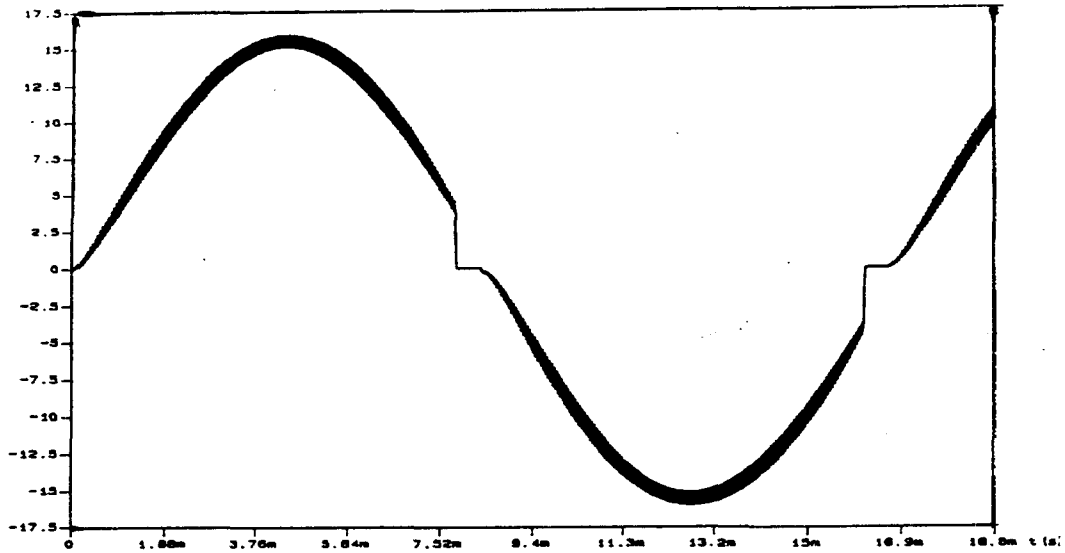


그림 9. 20[KHz] 스위칭 주파수에 대한 PWM 인버터 부하 전류.

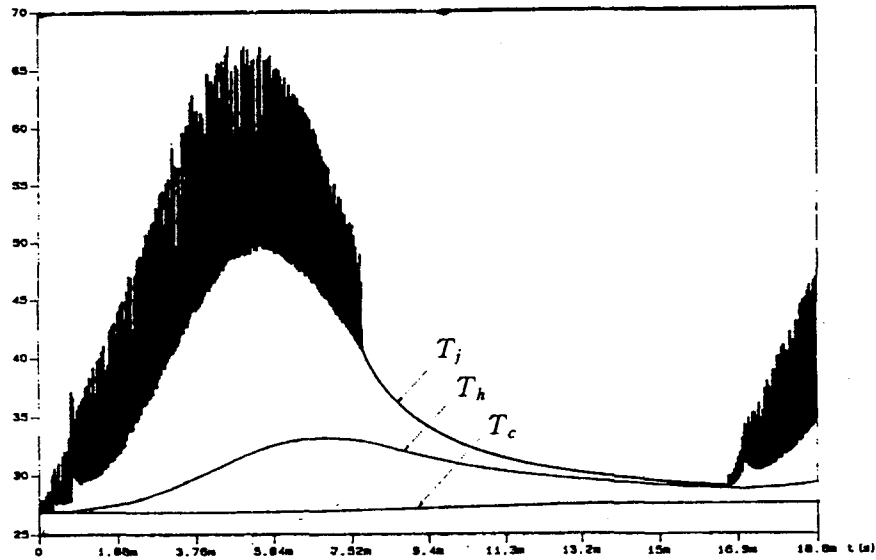


그림 10. 20[KHz] 스위칭 주파수에 IGBT의 실리콘 칩(T_j), 칩-패키지 TO247(T_h), 방열판 TTC1406(T_c) 표면 온도특성 시뮬레이션 파형.

V. 결 론

본 논문에서 사용한 전열회로망 시뮬레이션 방법은 Sun SPARCstation2 Workstation상에서 Saber 시뮬레이터를 이용하여 PWM IGBT 인버터를 해석하기 위해 사용했다. 이러한 해석에서

IGBT의 순시온도는 PWM 인버터의 조건을 사용한 회로로 결정되고, PWM 인버터의 전기적인 동작의 반응에 대한 열적 영향 또한 결정된다. 이것은 전기시스템의 열적처리의 가격이 회로설계의 효율에 의존하고 반도체 소자의 자기열이 전기

회로의 동작에 영향을 미치기 때문에 중요하다. 이러한 기술은 단상 60[Hz] 싸이클을 넘어선 소비된 전력들의 주기적인 합을 Saber 파형 계산기를 사용하여 시스템의 정상상태 대신호 응답을 시뮬레이션하기 위해 제안했다. 실리콘 칩의 열적응답은 소자 스위칭 싸이클 동안 IGBT 온도상승으로 결정되고 TO247 패키지의 열적반응과 실리콘 칩은 60[Hz] 정현파 출력의 한상동안 소자온도상승을 결정한다. 그리고 방열판의 열적 상승은 시스템이 구동되고 부하 임피던스가 변화하는 동안 소자상승으로 결정된다. 이러한 이유로 인해 전력용반도체소자에서 발생하는 열은 전열시스템에서 화재로 발생하는 요인으로는 상당히 미미함을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Muhammad H. Rashid, SPICE for Power Electronics and Electric Power, Prentice-Hall

- Inc., 1993.
2. Saber Reference Manual, Analogy Inc. : Beaverton, OR. 1992.
3. 서영수 외 2인, "IGBT 소자의 모델링에 의한 회로해석 시뮬레이션", 명지대학교 산업기술연구소, 제13집, pp.10~20, 1994.
4. A.R. Hefner, "Characterization and Modeling of the Power Insulated Gate Bipolar Transistor", Ph.D Dissertation, Univ. of Maryland. Ann Arbor, MI : Univ, Microfilms, Int., 1987.
5. 서수호, "IGBT 소자의 모델링에 의한 회로해석 시뮬레이션", 명지대학교 석사논문, 1994.
6. G.N. Ellison, Thermal Computation for Electric Equipment, Van Nosttrand Reinhold : New York, pp.218, 1984.
7. Gordon R. Slemon, et. al., "Analysis of ac-to-dc Voltage Source Converter using PWM with Phase and amplitude Control", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 27, No. 2, March.