



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2018년09월17일
(11) 등록번호 10-1899618
(24) 등록일자 2018년09월11일

(51) 국제특허분류(Int. Cl.)
H02M 7/48 (2007.01) G01K 7/00 (2006.01)
H02M 7/42 (2006.01) H02M 7/44 (2006.01)
(21) 출원번호 10-2013-7022685
(22) 출원일자(국제) 2012년02월16일
심사청구일자 2016년12월15일
(85) 번역문제출일자 2013년08월27일
(65) 공개번호 10-2014-0007877
(43) 공개일자 2014년01월20일
(86) 국제출원번호 PCT/US2012/025452
(87) 국제공개번호 WO 2013/101267
국제공개일자 2013년07월04일
(30) 우선권주장
13/037,261 2011년02월28일 미국(US)
(56) 선행기술조사문헌
US20080251589 A1
US20050073281 A1
US20100079944 A1
JP10164703 A

(73) 특허권자
제너럴 일렉트릭 캄파니
미합중국 뉴욕 (우편번호 12345) 웨넥테디 원 리
버 로우드
(72) 발명자
이오아니디스 디미트리오스
미국 펜실베이니아주 16531-0001 이리 이스트 레이
크 로드 2901
(74) 대리인
제일특허법인(유)

전체 청구항 수 : 총 14 항

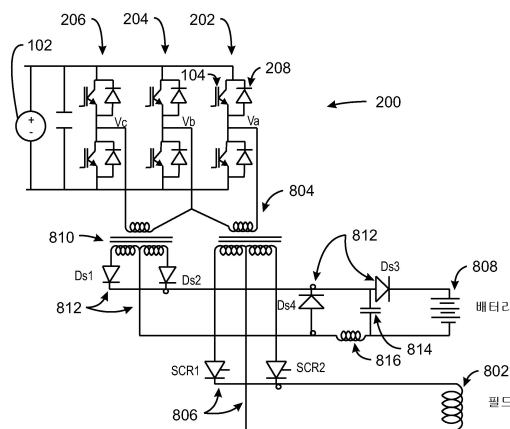
심사관 : 광인구

(54) 발명의 명칭 배터리 충전기와 여자기를 포함하는 전자 디바이스의 전력 핸들링을 개선시키기 위한 시스템 및 방법

(57) 요약

히트싱크와, 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기(field exciter)로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와, 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와, 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기와 배터리 충전기에 공통인 제 3 듀얼 IGBT를 포함하는 전자 디바이스가 제공된다. 예시적 전자 디바이스는 또한 히트싱크에 배치된 단일의 온도 센서와, 단일의 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 온도 판독치에 기초하여, 제 1 듀얼 IGBT, 제 2 듀얼 IGBT, 또는 제 3 듀얼 IGBT 중의 적어도 하나의 접합 온도를 추정하도록 구성된 제어기를 포함한다.

대표도 - 도8



명세서

청구범위

청구항 1

전자 디바이스로서,

히트싱크와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기(field exciter)로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 상기 배터리에 공통인 제 3 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 배치된 단일 온도 센서와,

플래넘(plenum) 및 공기 흐름의 가변 소스를 포함하는 냉각 유닛과,

상기 단일 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 1 듀얼 IGBT, 상기 제 2 듀얼 IGBT, 또는 상기 제 3 듀얼 IGBT 중 적어도 두 듀얼 IGBT에 대해 요구되는 냉각 레벨들을 결정하도록 구성된 제어기를 포함하되, 상기 요구되는 냉각 레벨들은 서로 상이하며 상기 냉각 유닛에 의해 제공되는 공기 흐름률은 상기 요구되는 냉각 레벨들에 기초하여 결정되는

전자 디바이스.

청구항 2

제 1 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 온도 판독치에 적어도 부분적으로 기초하여 상기 적어도 두 듀얼 IGBT의 접합 온도를 추정하도록 구성되고, 상기 요구되는 냉각 레벨들은 상기 접합 온도에 적어도 부분적으로 기초하여 결정되는

전자 디바이스.

청구항 3

제 1 항에 있어서,

상기 적어도 두 듀얼 IGBT는 적어도 상기 제 2 듀얼 IGBT 및 상기 제 3 듀얼 IGBT를 포함하며, 상기 온도 센서는 상기 히트싱크 내의 상기 제 2 듀얼 IGBT와 상기 제 3 듀얼 IGBT 사이에 배치되며, 상기 제어기는 상기 온도 판독치에 기초하여 적어도 상기 제 2 듀얼 IGBT 및 상기 제 3 듀얼 IGBT의 접합 온도를 추정하도록 구성되고, 상기 요구되는 냉각 레벨들은 적어도 상기 제 2 듀얼 IGBT와 상기 제 3 듀얼 IGBT에 접합 온도에 적어도 부분적으로 기초하여 결정되는

전자 디바이스.

청구항 4

제 1 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 듀얼 IGBT 중 적어도 하나의 전력 레벨을 요구되는 부하 전류 및 상기 듀얼 IGBT가 스위치 온 하도록 지시되는 시간에 적어도 부분적으로 기초하여 추정하도록 구성되고, 상기 듀얼 IGBT에 대응하는 요구되는 냉각 레벨은 상기 전력 레벨에 적어도 부분적으로 기초하는

전자 디바이스.

청구항 5

전자 디바이스로서,

히트싱크와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 상기 배터리에 공통인 제 3 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 배치된 온도 센서와,

플래넌 및 공기 흐름의 가변 소스를 포함하는 냉각 유닛과,

상기 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 1 듀얼 IGBT, 상기 제 2 듀얼 IGBT, 또는 상기 제 3 듀얼 IGBT 중 적어도 하나의 듀얼 IGBT에 대해 요구되는 냉각 레벨을 결정하도록 구성된 제어기를 포함하되,

상기 냉각 유닛에 의해 제공되는 공기 흐름률은 상기 요구되는 냉각 레벨에 기초하여 결정되고, 상기 제어기는 상기 제 2 듀얼 IGBT에 대한 제 1 요구되는 냉각 레벨 및 상기 제 3 듀얼 IGBT에 대한 제 2 요구되는 냉각 레벨을 결정하고, 상기 제 1 요구되는 냉각 레벨 및 상기 제 2 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 신호를 시스템 제어기로 송신하며, 상기 시스템 제어기는 상기 신호에 적어도 부분적으로 기초하여 상기 공기 흐름률을 제어하는

전자 디바이스.

청구항 6

제 5 항에 있어서,

상기 시스템 제어기는 상기 제 1 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 제 1 요구되는 공기 흐름률 및 상기 제 2 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 제 2 요구되는 공기 흐름률을 계산하며, 상기 공기 흐름률은 상기 제 1 요구되는 공기 흐름률 및 상기 제 2 요구되는 공기 흐름률 중 더 큰 것에 기초하는

전자 디바이스.

청구항 7

전자 디바이스로서,

히트싱크와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 상기 배터리에 공통인 제 3 듀얼 IGBT와,

상기 히트싱크에 배치된 온도 센서와,

플래넌 및 공기 흐름의 가변 소스를 포함하는 냉각 유닛과,

상기 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 2 듀얼 IGBT에 대해 제 1 요구되는 냉각 레벨 및 제 1 전력 레벨을 결정하고, 상기 제 3 듀얼 IGBT에 대해 제 2 요구되는 냉각 레벨 및 제 2 전력 레벨을 결정하도록 구성된 제어기를 포함하되,

상기 제 1 전력 레벨이 상기 제 2 전력 레벨 보다 더 크면, 상기 제 1 전력 레벨 및 상기 제 1 요구되는 냉각

레벨에 대응하는 신호를 시스템 제어기로 송신하고, 그렇지 않으면, 상기 제 2 전력 레벨 및 상기 제 2 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 신호를 상기 시스템 제어기로 송신하며, 상기 시스템 제어기는 상기 신호에 적어도 부분적으로 기초하여 공기 흐름률을 제어하는 전자 디바이스.

청구항 8

차량 전력 시스템으로서,

히트싱크와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 배터리 충전기에 공통인 제 3 듀얼 IGBT를 포함하는 듀얼 H-브리지와,

상기 히트싱크에 배치된 단일 온도 센서와,

플래넵 및 공기 흐름의 가변 소스를 포함하는 냉각 유닛과,

상기 단일 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 1 듀얼 IGBT, 상기 제 2 듀얼 IGBT, 또는 상기 제 3 듀얼 IGBT 중 적어도 두 듀얼 IGBT에 대해 요구되는 냉각 레벨들을 결정하도록 구성된 제어기를 포함하되, 상기 요구되는 냉각 레벨들은 서로 상이하고 상기 냉각 유닛에 의해 제공되는 공기 흐름률은 상기 요구되는 냉각 레벨들에 기초하여 결정되는

차량 전력 시스템.

청구항 9

제 8 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 온도 판독치에 적어도 부분적으로 기초하여 상기 적어도 두 듀얼 IGBT의 접합 온도를 추정하도록 구성하고, 상기 요구되는 냉각 레벨들은 상기 접합 온도에 적어도 부분적으로 기초하여 결정되는

차량 전력 시스템.

청구항 10

제 8 항에 있어서,

상기 적어도 두 듀얼 IGBT는 적어도 상기 제 2 듀얼 IGBT 및 상기 제 3 듀얼 IGBT를 포함하며, 상기 온도 센서는 상기 히트싱크 내의 상기 제 2 듀얼 IGBT와 상기 제 3 듀얼 IGBT 사이에 배치되며, 상기 제어기는 상기 온도 판독치에 기초하여 적어도 상기 제 2 듀얼 IGBT와 상기 제 3 듀얼 IGBT의 접합 온도를 추정하도록 구성되는

차량 전력 시스템.

청구항 11

제 8 항에 있어서,

상기 제어기는 상기 듀얼 IGBT 중 적어도 하나의 전력 레벨을 요구되는 부하 전류 및 상기 듀얼 IGBT가 스위치 온 하도록 지시되는 시간에 적어도 부분적으로 기초하여 추정하도록 구성되고, 상기 듀얼 IGBT에 대응하는 요구되는 냉각 레벨은 상기 전력 레벨에 적어도 부분적으로 기초하는

차량 전력 시스템.

청구항 12

차량 전력 시스템으로서,

히트싱크와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 배터리 충전기에 공통인 제 3 듀얼 IGBT를 포함하는 듀얼 H-브리지와,

상기 히트싱크에 배치된 온도 센서와,

플래넘 및 공기 흐름의 가변 소스를 포함하는 냉각 유닛과,

상기 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 1 듀얼 IGBT, 상기 제 2 듀얼 IGBT, 또는 상기 제 3 듀얼 IGBT 중 적어도 하나에 대해 요구되는 냉각 레벨을 결정하도록 구성된 제어기를 포함하되,

상기 냉각 유닛에 의해 제공되는 공기 흐름률은 상기 요구되는 냉각 레벨에 기초하여 결정되고, 상기 제어기는 상기 제 2 듀얼 IGBT에 대한 제 1 요구되는 냉각 레벨 및 상기 제 3 듀얼 IGBT에 대한 제 2 요구되는 냉각 레벨을 결정하고, 상기 제 1 요구되는 냉각 레벨 및 상기 제 2 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 신호를 시스템 제어기로 송신하며, 상기 시스템 제어기는 상기 신호에 적어도 부분적으로 기초하여 상기 공기 흐름률을 제어하는

차량 전력 시스템.

청구항 13

제 12 항에 있어서,

상기 시스템 제어기는 상기 제 1 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 제 1 요구되는 공기 흐름률 및 상기 제 2 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 제 2 요구되는 공기 흐름률을 계산하며, 상기 공기 흐름률은 상기 제 1 요구되는 공기 흐름률 및 상기 제 2 요구되는 공기 흐름률 중 더 큰 것에 기초하는

차량 전력 시스템.

청구항 14

제 12 항에 있어서,

상기 제어기는,

상기 제 2 듀얼 IGBT에 대해 제 1 요구되는 냉각 레벨 및 제 1 전력 레벨을 결정하고,

상기 제 3 듀얼 IGBT에 대해 제 2 요구되는 냉각 레벨 및 제 2 전력 레벨을 결정하고,

상기 제 1 전력 레벨이 상기 제 2 전력 레벨 보다 더 크면, 상기 제 1 전력 레벨 및 상기 제 1 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 신호를 상기 시스템 제어기로 송신하고, 그렇지 않으면, 상기 제 2 전력 레벨 및 상기 제 2 요구되는 냉각 레벨에 대응하는 신호를 상기 시스템 제어기로 송신하며, 상기 시스템 제어기는 상기 신호에 적어도 부분적으로 기초하여 공기 흐름률을 제어하는

차량 전력 시스템.

청구항 15

삭제

청구항 16

삭제

청구항 17

삭제

청구항 18

삭제

청구항 19

삭제

청구항 20

삭제

발명의 설명

기술 분야

[0001] 본 발명의 예시적 실시예들은 일반적으로 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 인버터와 같은 전자 디바이스의 전력 핸들링을 개선시키기 위한 시스템 및 방법에 관한 것이다. 또한, 이러한 예시적 실시예들은 IGBT(insulated gate bipolar transistor) 인버터의 온도를 모델링, 모니터링, 및 저감시키는 것에 관한 것일 수 있다.

배경 기술

[0002] 예를 들어, 기관차와 같은 건인 차량들은 차량의 휠을 구동하기 위하여 전기 트랙션 모터를 사용한다. 이들 차량의 일부에 있어서, 모터들은 그 모터들의 계자 권선에 공급되는 AC 전력의 전압 및 주파수를 달라지게 하는 것에 의해 속도와 파워가 제어되는 교류(AC) 모터이다. 일반적으로, 전력은 어느 시점에 DC 전력으로서 차량 시스템에 공급되며, 그 후에 IGBT와 같은 일련의 스위치들을 포함하는 인버터와 같은 회로에 의해 제어된 주파수와 전압 크기를 갖는 AC 전력으로 변환된다. 일부 시스템들에 있어서, 전력은 인버터의 레그(leg)에 커플링된 전기적 배터리들의 뱅크(bank)에서 얻어질 수 있다. 인버터는 배터리-충전 모드 및 배터리-방전 모드로 작동하도록 구성될 수 있다. 배터리-충전 모드 동안, 계자 권선으로부터의 전기 에너지는 배터리들을 충전하는데 사용된다. 배터리-방전 모드 동안, 배터리들에 저장된 전기 에너지는 모터들의 계자 권선에 전력을 공급하는데 사용된다. 인버터의 전력 핸들링 능력은 IGBT들의 전류에 의해 생성된 열을 방출하는 IGBT들의 능력에 의해, 적어도 부분적으로, 제한된다. 또한, 인버터의 IGBT들의 온도를 모델링하기 위한 개선된 시스템 및 방법을 가지는 것이 유익할 것이다. 개선된 온도 모델링 기술들은 열 방출을 개선하는 것에 의해 인버터들의 전력 핸들링 능력을 개선하는데 사용될 수 있다. 또한, 개선된 온도 모델링 기술들은 작동중에 IGBT 온도를 모니터링하는 기술들을 제공하는데 사용될 수도 있다.

발명의 내용

해결하려는 과제

과제의 해결 수단

[0003] 히트싱크와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기(field exciter)로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 배터리 충전기에 공통인 제 3 듀얼 IGBT를 포함하는 전자 디바이스가 제공된다. 상기 예시적 전자 디바이스는 또한 상기 히트싱크에 배치된 단일의 온도 센서와, 상기 단일의 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 1 듀얼 IGBT, 상기 제 2 듀얼 IGBT, 또는 상기 제 3 듀얼 IGBT 중의 적어도 하나의 접합 온도를 추정하도록 구성된 제어기를 포함한다.

[0004] 다른 예시적 실시예에서는, 접합 온도들을 추정하는 방법이 제공된다. 상기 방법은 모터와 배터리 충전 회로의

계자 권선으로 전류를 제공하도록 듀얼 H-브리지의 IGBT들로 신호들을 제공하는 단계로서, 상기 IGBT들은 히트싱크에 커플링되어 있는, 상기 신호들을 제공하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 또한 상기 히트싱크에 배치된 단일의 온도 센서로부터 온도 판독치를 수신하는 단계를 포함한다. 상기 방법은 또한 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 IGBT들 중의 적어도 하나에 대한 접합 온도들을 추정하는 단계를 포함한다.

[0005]

다른 예시적 실시예에서는, 히트싱크와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 여자기(field exciter)로 전력을 제공하도록 구성된 제 1 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 배터리로 전력을 제공하도록 구성된 제 2 듀얼 IGBT와, 상기 히트싱크에 커플링되어 있으며 상기 여자기와 배터리 충전기에 공통인 제 3 듀얼 IGBT를 포함하는 차량용 전력 시스템이 제공된다. 상기 전력 시스템은 또한 상기 히트싱크에 배치된 단일의 온도 센서와, 상기 단일의 온도 센서로부터의 온도 판독치를 수신하고, 상기 온도 판독치에 기초하여, 상기 제 1 듀얼 IGBT, 상기 제 2 듀얼 IGBT, 또는 상기 제 3 듀얼 IGBT 중의 적어도 하나의 접합 온도를 추정하도록 구성된 제어기를 포함한다.

도면의 간단한 설명

[0006]

본 발명의 이들 및 다른 특징, 양태, 이점은 첨부 도면들을 참조하여 다음의 상세한 설명을 독해할 때에 더욱 용이하게 이해될 것이다. 도면들의 전반에 걸쳐, 첨부 도면들에서의 유사 문자들은 유사 부품들을 나타낸다.

도 1은 H-브리지 컨버터의 블록도이다.

도 2는 실시예들에 따른, 듀얼 H-브리지의 블록도이다.

도 3은 실시예들에 따른, 듀얼 H-브리지의 열 네트워크(thermal network)를 나타내는 블록도이다.

도 4a 내지 도 4d는 듀얼 H-브리지에 대한 열 임피던스 모델들을 얻는데 사용된 데이터를 생성하기 위한 테스트 구성들을 나타내는 블록도들이다.

도 5는 도 4 및 도 7에 관하여 논의된 온도들을 측정하기 위한 서모커플 구성을 나타내는 블록도이다.

도 6a 내지 도 6f는 도 4d에 나타낸 테스트 구성을 사용하여, 시간에 따른 측정 온도들과 컴퓨터 모델링된 온도들의 비교를 나타낸 그래프들이다.

도 7a 및 도 7b는 추정된 냉각 곡선들과 측정된 냉각 곡선들을 비교한 그래프들이다.

도 8은 실시예들에 따른, 듀얼 H-브리지를 사용하는 시스템의 블록도이다.

도 9는 위상 A, 위상 B, 및 위상 C IGBT들의 출력 전압들의 그래프이다.

도 10은 도 9의 출력 전압들 위에 겹쳐진 예상 출력 전류의 그래프이다.

도 11은 단일 H-브리지로부터의 출력 전류의 그래프이다.

도 12a 및 도 12b는 위상 A 또는 위상 C IGBT에 대한 전류 파형의 그래프들이다.

도 13a 내지 도 13c는 위상 B의 IGBT들(104) 및 다이오드들(208)에 대한 전류 파형들을 나타내는 그래프들이다.

도 14는 위상 A와 위상 C IGBT들 및 다이오드들에서의 전력 손실을 추정하는데 사용되는 전류 및 전압 파형의 그래프이다.

도 15는 위상 B(공통) IGBT들 및 다이오드들에서의 전력 손실을 추정하는데 사용되는 전류 및 전압 파형의 그래프이다.

도 16은 냉각 유닛을 가진 듀얼 H-브리지의 블록도이다.

도 17은 실시간 히트싱크 온도 판독치들을 제공하도록 구성된 듀얼 H-브리지의 블록도이다.

도 18은 작동 중의 듀얼 H-브리지에서의 열 흐름의 흐름도이다.

도 19a 내지 도 19c는 각종 테스트 구성에 대한 시간에 따른 추정 $TS_{XX} - T_{in1}$ 과 실제 측정된 $TS_{XX} - T_{in1}$ 의 그래프들이다.

도 20은 듀얼 H-브리지에서 IGBT들의 접합 온도들을 추정하는 회로의 블록도이다.

도 21은 추정되는 소망 냉각 량에 기초하여 공기 흐름률을 제어하는 듀얼 H-브리지용 시스템 제어기의 블록도이다.

다.

도 22는 추정되는 소망 냉각 량에 기초하여 공기 흐름률을 제어하는 듀얼 H-브리지용 시스템 제어기의 블록도이다.

도 23은 실시예들에 따라, 부하 전류를 저하시키는데 사용되는 제어 루프의 블록도이다.

도 24는 실시예들에 따라, 부하 전류를 저하시키는데 사용되는 제어 루프의 블록도이다.

도 25는 본 발명의 예시적 실시예에 따른 인버터 제어 회로를 사용할 수 있는 디젤-전기 기관차의 블록도이다.

발명을 실시하기 위한 구체적인 내용

- [0007] 도 1은 H-브리지 컨버터의 블록도이다. H-브리지 컨버터(100)는 직류(DC) 전압을 사각 교류(AC) 파형으로 변환하는데 사용될 수 있으며, 전력 전자 산업에 있어서 다양한 응용들을 갖는다. H-브리지 컨버터(100)는 DC 라인으로부터 전력이 공급되고 변압기들이 전압 저감 및/또는 회로의 분리를 위해 사용되는 경우 폭 넓게 사용된다. 도 1에 도시된 바와 같이, 입력 전압(102)은 4개의 전자 스위치들(104)(예컨대, IGBT들)의 그룹으로 공급된다. 스위치들(104)의 출력은 변압기(108)의 일차 권선(106)으로 공급된다. H-브리지 컨버터(100)의 스위치들(104)은 주어진 입력 DC 전압(102)을 쇼핑(chopping)하여 사각 파형을 생성하며, 이것은 변압기(108)의 일차 권선(106)으로 공급된다. 생성된 사각 파형은 입력 DC 전압(102)과 동일한 피크(peak) 전압을 갖는다. 변압기(108)의 인덕턴스로 인하여, 변압기(108)의 이차 권선(110)의 출력(112)은 근사 AC 파형 및 변압기(108)의 권선비(turns ratio)만큼 승산된 입력 DC 전압(102)과 동일한 피크 전압을 갖는다. 보통, 변압기(108)의 이차 권선(110) 내에는 이차 권선의 근사 AC 파형을 입력 DC 전압에 비해 감소된 크기를 갖는 DC 파형으로 정류시키는 정류기가 존재한다.
- [0008] 도 2는 실시예들에 따른, 듀얼 H-브리지의 블록도이다. 듀얼 H-브리지(200)는 하나의 레그(leg)가 공통인 2개의 H-브리지들을 포함하며 2개의 개별 H-브리지들의 기능을 제공하는 컨버터일 수 있다. 듀얼 H-브리지(200)에서는, 공통 입력 전압(102)이 6개의 전자 스위치들(104)(예컨대, IGBT들)로 공급된다. 스위치들(104)은 본 명세서에서 "위상 A"(202)로 지칭되는 제 1 레그, 본 명세서에서 "위상 B" 또는 "공통"(204)으로 지칭되는 제 2 레그, 및 본 명세서에서 "위상 C"(206)로 지칭되는 제 3 레그를 포함한다. 각 레그는 한 쌍의 스위치들(104)을 포함한다. 일 실시예에서, "프리휠링(freewheeling)" 또는 "플라이백(flyback)" 다이오드로 지칭되는 다이오드(208)는 각 스위치와 병렬로 배치될 수 있다. 위상 A(202) 및 위상 B(204) 스위치들의 출력은 제 1 변압기(210)로 공급된다. 위상 B(204) 및 위상 C(206) 스위치들의 출력은 제 2 변압기(212)로 공급된다. 일 실시예에서, 제 1 변압기(210)의 출력(214)은 배터리 충전 회로에 전력을 공급하는데 사용되며, 제 2 변압기(212)의 출력(216)은 여자기(field exciter)에 전력을 공급하는데 사용된다. 배터리 충전 회로와 여자기에 대한 듀얼 H-브리지의 커플링은 도 8과 관련하여 아래에서 더 논의되어 있다.
- [0009] 듀얼 H-브리지에서는 3개의 위상들에 대응하는 3개의 레그들(202, 204, 및 206)이 사용되기 때문에, 3개의 위상 인버터의 하드웨어가 채용되어 있다. 듀얼 H-브리지는 스위치들(104)에 대한 열 방출을 제공하기 위한 단일의 히트싱크를 사용하는 단일 하우징으로 구현될 수 있다. 실시예들에서, 히트싱크는 그 히트싱크를 가로지르는 공기를 강제하는 것에 의해 냉각된다. 듀얼 H-브리지 토폴로지로 인하여, 각 레그에 나타나는 전력 손실은 상이한 전력 손실을 갖는다. 또한, 공통 히트싱크의 강제 공기 냉각은 듀얼 H-브리지의 3개의 레그들에 관한 균등하지 않은 냉각 공기 흐름을 야기할 수 있으며, 3개의 위상들의 각각에 관한 열저항이 불균일하게 한다. 일반적으로, 듀얼 H-브리지의 전력 핸들링 능력은 가장 뜨거운 레그에 의해 제한된다. 따라서, 3개의 위상들의 균등하지 않은 전력 분배 및 균등하지 않은 냉각은 듀얼 H-브리지의 전체 전력 핸들링 능력을 저감시킬 수 있다. 실시예들에 따라, 듀얼 H-브리지의 열적 응답을 분석하는 모델이 생성되었다.
- [0010] 열 임피던스 모델들
- [0011] 도 3은 실시예들에 따른, 듀얼 H-브리지의 열 네트워크를 나타내는 블록도이다. 도 3에 도시된 바와 같이, 열 네트워크(300)는 듀얼 모듈(302)로 둘러싸인 3개 쌍의 IGBT를 포함하며, 여기서 각 듀얼 모듈(302)은 예를 들어, 실리콘 카바이드 입자들을 가진 알루미늄 기질로 이루어진 금속 기질 복합체일 수 있는 케이스(304)로 둘러싸여 있다. 각 케이스(304)는 열 전도성 그리스(308)의 층을 이용하여 히트싱크(306)에 커플링될 수 있다. 히트싱크(306)는 예를 들어, 핀(fin)들(310)을 통해 냉각 공기의 흐름과 접촉될 수 있다.
- [0012] 각 듀얼 모듈은 한 쌍의 IGBT들을 포함할 수 있으며, 각각의 IGBT는 그것의 각 다이오드와 병렬로 커플링되어 있다. 도 3에 도시된 바와 같이, P IGBT(312)는 각각의 IGBT에서 가열을 위해 변환되는 전체 전력을 나타내며,

P 다이오드(314)는 각각의 다이오드에서 가열을 위해 변환되는 전체 전력을 나타낸다. 각 IGBT의 접합-케이스(junction-to-case) 열저항, "Rth (IGBT j-c)" 은 열저항(316)으로 나타나 있으며, 대략 0.024 켈빈 퍼 와트(K/W)일 수 있다. 각 다이오드의 접합-케이스(junction-to-case) 열저항, "Rth (Diode j-c)" 은 열저항(318)으로 나타나 있으며, 대략 0.048 K/W일 수 있다. 히트싱크와 케이스 간의 접합의 열저항, "Rth (c-h)"은 열저항(320)으로 나타나 있으며, 대략 0.018 K/W일 수 있다. 히트싱크의 열저항, "Rth (heatsink)"는 열저항(322)으로 나타나 있으며, 특정 공기 흐름에 대해 대략 0.0218 K/W일 수 있다. 열 네트워크(300)를 사용하여, 균등하지 않게 냉각된 히트싱크(306)의 열적 거동이 분석됨으로써 냉각 공기의 온도에 대한 각 위상 아래에 있는 가장 뜨거운 지점 사이의 온도 차를 공기 흐름의 함수로서 기술하는 열 임피던스 모델들을 얻을 수 있다. 그 결과값은 기관차들에서 실시간으로 사용될 수 있다.

[0013] 도 4a 내지 도 4d는 듀얼 H-브리지에 대한 열 임피던스 모델들을 얻기 위해 사용되는 데이터를 생성하는 테스트 구성들을 나타내는 블록도들이다. 도 4a 내지 도 4d에 도시된 바와 같이, 듀얼 H-브리지의 위상 B는 좌측에 있고, 듀얼 H-브리지의 위상 C는 중앙에 있으며, 듀얼 H-브리지의 위상 A는 우측에 있다. 전압원(208)은 도 4a 내지 도 4d에 도시된, 열적 테스트 목적으로 사용된, 상이한 조합들에서의 각 위상의 IGBT들로 정상 상태 전류 I_o 를 제공하는데 사용된다. 전술한 바와 같이, 3개의 위상들(202, 204, 및 206)의 각각은 동일한 히트싱크(306)에 열적으로 커플링되어 있다.

[0014] 도 4a는 모든 6개의 IGBT들에 동일 레벨의 전류 I_o 가 전력 공급되는 테스트 구성을 나타낸다. 구체적으로, 모든 3개의 위상들은 모두 직렬로 전기적 커플링되어 있다. 도 4b는 위상 B 와 위상 C 만이 직렬로 커플링되고 전류 I_o 로 전력 공급되는 테스트 구성을 나타낸다. 도 4c는 위상 C 와 위상 A 만이 직렬로 커플링되고 전류 I_o 로 전력 공급되는 테스트 구성을 나타낸다. 도 4d는 위상 B가 전류 I_o 로 전력 공급되며, 각각의 위상 C 와 위상 A 는 위상 B의 전력 공급에 사용되는 전류의 절반 또는 $I_o/2$ 로 전력 공급되는 테스트 구성을 나타낸다.

[0015] 각각의 도 4a 내지 도 4d의 테스트 구성에 있어서, IGBT들은 완전히 온(ON)이고 스위칭되지 않으며, 따라서, 어떠한 전류도 다이오드들을 통해 흐르지 않고 있다. 온도, T_a 는 참조 번호 210으로 표시된 바와 같이, 위상 A(202) 아래 케이스(304)의 가장 뜨거운 지점의 온도를 나타낸다. 온도, T_b 는 참조 번호 212로 표시된 바와 같이, 위상 B(204) 아래 케이스(304)의 가장 뜨거운 지점의 온도를 나타낸다. 온도, T_c 는 참조 번호 214로 표시된 바와 같이, 위상 C(206) 아래 케이스(304)의 가장 뜨거운 지점의 온도를 나타낸다. 또한, $V_{ce A+}$ 는 위상 A(202)에서의 제 1 IGBT에 걸친 콜렉터-에미터 전압이고, $V_{ce A-}$ 는 위상 A(202)에서의 제 2 IGBT에 걸친 콜렉터-에미터 전압이며, 위상들의 각각에 대해 이와 같이 하나이다.

[0016] 앞서 설명한 모델을 고려하면, 위상들 중의 하나에서의 전류가 듀얼 H-브리지(200)의 각 위상들의 가장 뜨거운 지점 아래의 온도를 가지는 열적 효과(thermal effect)를 판정하는 것이 가능하다. IGBT들 모두가 스위치 온 된 상태에서 위상 B의 듀얼 IGBT들에 대해 전류 I_o 가 인가되는 것으로 가정하는 경우, 상기 쌍의 IGBT들에 의해 소모된 전력은 등식 $PB = I_o * (V_{ceB+} + V_{ceB-})$ 에 따라 계산될 수 있다. 위상 B에 의해 소모된 전력으로 인한 위상 B의 듀얼 IGBT의 가장 뜨거운 지점 아래의 온도는 $TB1$ 으로 지칭된다. 온도 차, $\delta TB1$ 은 $TB1$ 마이너스 공기의 온도 T_{air} 로서 계산될 수 있다. 전류 I_o 가 위상 C에 인가되는 경우, 위상 C IGBT들에 의해 소모된 전력은 등식 $PC = I_o * (V_{ceC+} + V_{ceC-})$ 에 따라 계산될 수 있으며, 위상 C에서의 전력으로 인한, 위상 B 아래의 가장 뜨거운 지점의 온도 $TB(212)$ 는 $TB2$ 로 지칭된다. 마찬가지로, 전류 I_o 가 위상 A에 인가되는 경우, 위상 A IGBT들에 의해 소모된 전력은 등식 $PA = I_o * (V_{ceA+} + V_{ceA-})$ 에 따라 계산될 수 있으며, 위상 A에서의 전력으로 인한, 위상 B 아래의 가장 뜨거운 지점의 온도 $TB(212)$ 는 $TB3$ 으로 지칭된다.

[0017] 위상들 B, C, 및 A에서의 전류로 인한 위상 B 아래의 온도를 상승시키는 열저항들은 다음의 등식에 따라 계산될 수 있다:

[0018] $\delta TB1 = RB * PB$

[0019] $\delta TB2 = RBC * PC$

[0020] $\delta TB3 = RBA * PA$

[0021] 위의 등식들에서, RB는 위상 B에서의 전력 PB로 인하여 위상 B 아래의 온도를 상승시키는 열저항이다. RBC는 위상 C에서의 전력 PC로 인하여 위상 B 아래의 온도를 상승시키는 열저항이다. RBA는 위상 A에서의 전력 PA로 인하여 위상 B 아래의 온도를 상승시키는 열저항이다. 따라서, 위상 B 아래의 전체 온도 차 δTB 는 다음의 등식에 따라 계산될 수 있다:

[0022] $\delta T B = R B * P B + R B C * P C + R B A * P A$ eq. 3.1

[0023] 위상 A 및 위상 B에 대한 동일 분석들을 반복하면 다음을 따르게 된다:

[0024] $\delta T C = R C * P C + R B C * P B + R C A *$ eq. 3.2

[0025] $\delta T A = R A * P A + R B A * P C + R B A * P B$ eq. 3.3

[0026] 위의 등식들에서는, $R C B = R B C$, $R B A = R A B$, 및 $R C A = R A C$ 인 것으로 고려된다. 또한, 열저항은 등식 3.4에 나타나 있는 바와 같이, 온도 차를 전력으로 나누는 것으로 일반적으로 표현될 수 있으며, 여기서 X 는 A, B, 또는 C일 수 있다.

[0027] $R X t = \delta T X / P X$; 여기서 X = A, B 또는 C eq. 3.4

[0028] 등식 3.4를 등식들 3.1, 3.2 및 3.3으로 대체함으로써 다음을 따르게 된다:

[0029] $R A t = \delta T A / P A = R A + R C A * (P C / P A) + R B A * (P B / P A)$ eq. 3.5

[0030] $R B t = \delta T B / P B = R B + R B A * (P A / P B) + R B C * (P C / P B)$ eq. 3.6

[0031] $R C t = \delta T C / P C = R C + R B C * (P B / P C) + R C A * (P A / P C)$ eq. 3.7

[0032] 위의 등식들에서, $R A t$ 는 위상 A의 전체 전력(PA) 만큼 곱해지는 경우, 3개의 위상들을 통과하는 전력이 상이한 등식 3.3에서의 것과 동일한 $\delta T A$ 가 되는 위상 A에 대한 유효 열저항을 나타낸다. 유사한 정의들이 $R B t$ 및 $R C t$ 에 대해 적용된다. 위에서 기술된 등식들을 사용함으로써, 도 4a 내지 도 4c에 나타난 테스트 구성들을 사용하는 열적 테스트들이 수행될 수 있다. 테스트 결과들의 분석에 있어서, IGBT들의 파트 투 파트 편차(part to part variation)는 V_{ce_sat} 에 대해 미미한 영향을 갖는 것으로 가정된다. 그러므로, 전류 I_o 로 인하여 각각의 위상들에서 소모된 전력은 대략 동일하며 본 명세서에서는 P_{phase} 으로 지칭되는 것으로 고려된다. 또한, P_{phase} 는 전류 I_o 에 의해 결정되는 알려진 값이다. 온도들 $\delta T A$, $\delta T B$, $\delta T C$ 를 결정하기 위하여, 도 5와 관련하여 아래에 나타난 테스트 구성을 사용하는 온도 측정들이 취해질 수 있다.

[0033] 도 5는 도 4 및 도 7에 관하여 논의된 온도들을 측정하기 위한 서모커플 구성을 나타내는 블록도이다. 도 5에 도시된 바와 같이, 서모커플들(500)은 위상 A(202), 위상 B(204), 및 위상 C(206)에 대응하는 각각의 IGBT 모듈들 아래에 있는 케이스(304)에 부착될 수 있다. 서모커플들(500)은 1-12로 라벨링되어 있다. 아래에 기술된 테스트들에서는, 냉각 공기 흐름이 화살표(502)로 표시된 바와 같이, 모든 3개의 듀얼 IGBT들에 걸쳐 균등하게 분배되었다. 도 5의 서모커플 구성을 사용하여, 도 4a 내지 도 4c에 나타난 테스트 구성들의 각각에 대한 열적 데이터가 수집될 수 있다. 일 실시예에서, 위상 아래의 가장 뜨거운 지점을 식별하기 위해 각각의 듀얼 IGBT 아래에 4개의 서모커플들이 배치된다. 각 듀얼 IGBT에 있어서, 상기 4개의 서모커플들에 의해 측정된 가장 뜨거운 온도는 분석에 사용될 수 있다.

[0034] 도 4a에 나타난 테스트 구성에서, 전류 I_o 가 모든 3개의 위상들에 인가된다. 이에 따라, $P A = P B = P C = P_{phase}$ 가 된다. 정상 상태에 도달한 이후에, 각각의 위상들 아래 가장 뜨거운 지점들에서의 케이스(304)의 온도가 측정될 수 있으며, 히트싱크를 통과하여 흐르는 공기의 온도는 미리 선택된 레벨로 제어될 수 있다. 전력 데이터 및 측정된 온도 데이터를 사용함으로써, 등식들 3.5, 3.6, 및 3.7을 사용하여 열저항들 $R A t$, $R B t$, $R C t$ 이 계산될 수 있으며, 이것은 다음과 같이 단순화된다:

[0035] $R A t_{inv_TEST} = \delta T A / P_{phase} = R A + R B A + R C A$ eq. 3.8

[0036] $R B t_{inv_TEST} = \delta T B / P_{phase} = R B + R B A + R B C$ eq. 3.9

[0037] $R C t_{inv_TEST} = \delta T C / P_{phase} = R C + R B C + R C A$ eq. 3.10

[0038] 위의 등식들에서, $R A t_{inv_TEST}$, $R B t_{inv_TEST}$, 및 $R C t_{inv_TEST}$ 는 도 4a에 나타난 테스트 구성을 사용하여 수집된 데이터에 대해 계산된 열저항들 $R A t$, $R B t$, 및 $R C t$ 이다. $R A t_{inv_TEST}$, $R B t_{inv_TEST}$ 에 대한 테스트 결과들이 표 1 및 2에 나타나 있다. 표 1 및 2에 나타난 바와 같이, 테스트는 상이한 전류 레벨 및 상이한 공기 유량으로 반복될 수 있다.

표 1

Rat inv TEST				
SCFM	200	100	50	AVERAGE
200	0.064074	0.065422	0.062862	0.0641194
150	0.073421	0.074865	0.07686	0.0750485
100	0.094100	0.098478	0.098324	0.0969674
60		0.126707	0.128355	0.1275309
35		0.165805	0.17413	0.1699673
0		not equalized	0.911476	0.9114758

[0039]

표 2

RBt inv TEST				
SCFM	200	100	50	AVERAGE
200	0.057676	0.057225	0.053517	0.0561395
150	0.067774	0.066499	0.06803	0.0674342
100	0.085742	0.083852	0.083204	0.0842659
60		0.11603	0.112868	0.1144491
35		0.166233	0.164161	0.1651971
0		not equalized	0.916598	0.9165984

[0040]

[0041]

도 4b에 나타난 테스트 구성에서, 전류 Io 가 위상 B(204) 및 위상 C(206)에 인가된다. 이에 따라, PB = PC = Pphase 이며 PA = 0 이 된다. 정상 상태에 도달한 이후에, 각각의 위상들 아래 가장 뜨거운 지점들에서의 케이스(304)의 온도가 측정될 수 있으며, 히트싱크(306)(도 3)를 통과하여 흐르는 공기의 온도가 측정될 수 있다. 전력 데이터 및 측정된 온도 데이터를 사용함으로써, 등식들 3.6 및 3.7을 사용하여 열저항들 RBt 및 RCt이 계산될 수 있으며, 이것은 다음과 같이 단순화된다:

[0042]

$$RBt_hb_CB = \delta TB / Pphase = RB + RBA + RBC \quad eq. 3.11$$

[0043]

$$RCt_hb_CB = \delta TC / Pphase = RC + RBC + RCA \quad eq. 3.12$$

[0044]

위의 등식들에서, RBt_hb_CB, 및 RCt_hb_CB는 도 4b에 나타난 테스트 구성을 사용하여 수집된 데이터에 대해 계산된 열저항들 RBt 및 RCt 이다. RBt_hb_CB에 대한 테스트 결과들이 표 3에 나타나 있다. 표 3에 나타난 바와 같이, 테스트는 도 4a의 테스트 구성과 동일한 전류 레벨 및 공기 유량으로 반복될 수 있다.

표 3

RBt hb CB				
SCFM	200A	100A	50A	AVERAGE
200	0.059254	0.058382	0.058485	0.0587068
150	0.068631	0.067352	0.067621	0.067868
100	0.085433	0.08414	0.083709	0.0844272
60		0.112475	0.109937	0.1112061
35		0.157045	0.154595	0.1558199
0			0.755702	0.7557021

[0045]

[0046]

도 4c에 나타난 테스트 구성에서는, 전류 Io 가 위상 A(202) 및 위상 C(206)에 인가된다. 이에 따라, PA = PC = Pphase 이며 PB = 0 이 된다. 정상 상태에 도달한 이후에, 각 위상들의 아래 가장 뜨거운 지점들에서의 히트싱크(306)의 온도가 측정될 수 있으며, 히트싱크(306)를 통과하여 흐르는 공기의 온도가 측정될 수 있다. 전력 데이터 및 측정된 온도 데이터를 사용함으로써, 등식들 3.5 및 3.7을 사용하여 열저항들 RAt 및 RCt가 계산될 수

있으며, 이것은 다음과 같이 단순화된다:

[0047]
$$R_{At_hb_CA} = \delta TA / P_{phase} = R_A + R_{BA} + R_{CA} \quad eq. 3.13$$

[0048]
$$R_{Ct_hb_CA} = \delta TC / P_{phase} = R_C + R_{BC} + R_{CA} \quad eq. 3.14$$

[0049] 위의 등식들에서, $R_{At_hb_CA}$, 및 $R_{Ct_hb_CA}$ 는 도 4c에 나타난 테스트 구성을 사용하여 수집된 데이터에 대해 계산된 열저항들 R_{At} 및 R_{Ct} 이다. $R_{At_hb_CA}$ 에 대한 테스트 결과들이 표 4에 나타나 있다. 표 4에 나타난 바와 같이, 테스트는 도 4a 및 4b의 테스트 구성과 동일한 전류 레벨 및 공기 유량으로 반복될 수 있다.

표 4

Rat hb CA				
Rat hb CA				
SCFM	200A	100A	50A	AVERAGE
200	0.065646	0.066067	0.062899	0.0648705
150	0.075237	0.074923	0.074800	0.0749867
100	0.095842	0.097946	0.094780	0.0961895
60		0.125517	0.123958	0.1247371
35		0.164856	0.164629	0.1647427
0			0.643924	0.6439242

[0050]

[0051] 표 1-4 에 기술된 테스트 데이터에 기초할 때, 위상 A에서의 전력은 $R_{Bt_inv_TEST}$ 가 거의 $R_{Bt_hb_CB}$ 와 동일하기 때문에, 위상 B 측정값들에 의미있게 영향을 미치지 않는다는 것이 인식될 것이다. 마찬가지로, 위상 B에서의 전력은 $R_{At_inv_TEST}$ 가 거의 $R_{At_hb_CA}$ 와 동일하기 때문에, 위상 A 측정값들에 의미있게 영향을 미치지 않는다. 그러므로, $R_{AB} = R_{BA} = 0$ 이다. 따라서, 등식 3.8 내지 3.14는 다음과 같이 단순화될 수 있다:

$$R_{At_inv} = \delta TA / P_{phase} = R_A + R_{CA} \quad eq. 3.15$$

$$R_{Bt_inv} = \delta TB / P_{phase} = R_B + R_{CB} \quad eq. 3.16$$

$$R_{Ct_inv} = \delta TC / P_{phase} = R_C + R_{BC} + R_{CA} \quad eq. 3.17$$

$$R_{Bt_hb_CB} = \delta TB / P_{phase} = R_B + R_{CB} \quad eq. 3.18$$

$$R_{Ct_hb_CB} = \delta TC / P_{phase} = R_C + R_{CB} \quad eq. 3.19$$

$$R_{At_hb_CA} = \delta TA / P_{phase} = R_A + R_{CA} \quad eq. 3.20$$

$$R_{Ct_hb_CA} = \delta TC / P_{phase} = R_C + R_{CA} \quad eq. 3.21$$

[0052]

[0053] 등식 3.15 내지 3.21을 사용함으로써, 다음의 등식들 3.22 내지 3.27이 얻어질 수 있다. 구체적으로, 등식들 3.17 와 3.19 의 조합은 다음을 제공한다:

[0054]
$$R_{Ct_inv} - R_{Ct_hb_CB} = R_{CA} \quad eq.3.22$$

[0055] 등식들 3.20 와 3.22의 조합은 다음을 제공한다:

[0056]
$$R_{At_hb_CA} - R_{AC} = R_A \quad eq.3.23$$

[0057] 등식들 3.21 과 3.22의 조합은 다음을 제공한다:

[0058]
$$R_{Ct_hb_CA} - R_{AC} = R_C \quad eq.3.24$$

[0059] 등식들 3.17 과 3.21의 조합은 다음을 제공한다:

[0060]
$$R_{Ct_inv} - R_{Ct_hb_CA} = R_{CB} \quad eq.3.25$$

[0061] 등식들 3.18 과 3.25의 조합은 다음을 제공한다:

[0062]
$$R_{Bt_hb_CB} - R_{BC} = R_B \quad eq.3.26$$

[0063] 또한, 유효성 체크를 위해, 등식들 3.19 와 3.25가 조합되어 다음을 제공할 수 있다:

[0064]
$$R_{Ct_hb_CB} - R_{CB} = R_C \quad eq.3.27$$

[0065] 등식들 3.22 내지 3.25는 열적 테스트 결과들로부터 파라미터들 RA, RB, RC, RCB 및 RCA을 도출하는데 사용될 수 있다. 상기 열적 테스트들의 각각에 있어서, 측정들(서모커플들)이 히트싱크가 아닌 듀얼 IGBT들의 케이스 상에 위치해 있었기 때문에, 계산된 열저항들에 대해 보정 인자(correction factor)가 적용됨으로써 IGBT 모듈들(302)의 케이스(304)와 히트싱크(306)(도 3) 사이의 열적 그리스(308)를 설명할 수 있다. 구체적으로, 상술한 바와 같이, R_{Xt_TEST} (테스트 데이터로부터 계산된 열저항)은 위상 X 아래의 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도 T_{TEST} 마이너스 유입 공기 온도 T_{air} 를 위상 X의 전력 P_X 으로 나눈 것이며, 여기서 X는 A, B, 또는 C일 수 있다. 따라서, P_o 가 1 IGBT 및 1 다이오드의 전력 소모이고, 여기서 $P_{diode}=0$ 인 경우에는, 케이스 온도 T_{TEST} 가 다음의 공식에 따라 표현될 수 있다:

[0066]
$$T_{TEST} = T_{case} = T_{air} + P_o * R_{th_ch} + P_X * R_{Xt}$$

[0067] 상기 공식에서, R_{th_ch} 는 히트싱크에 대한 케이스 열저항을 나타내며, P_o 는 $P_{phase}/2$ 이다. P_X 를 $2 * P_o$ 로 대체하는 경우, $T_{TEST} - T_{air}$ 에 대한 해는 다음을 따른다:

[0068]
$$T_{TEST} - T_{air} = 2 * P_o * [(R_{th_ch} / 2) + R_{Xt}]$$

[0069] 즉,

[0070]
$$[T_{TEST} - T_{air}] / P_{phase} = R_{Xt_TEST} = (R_{th_ch} / 2) + R_{Xt}$$

[0071] 도 3을 참조하여 전술한 바와 같이, R_{th_ch} 는 거의 0.018도 C 퍼 와트($^{\circ}C/W$)일 수 있다. 따라서, 상기 공식에 기초하여, R_{Xt} 는 다음의 공식에 따라 결정될 수 있으며, 여기서 X는 A, B, 또는 C일 수 있다:

[0072]
$$R_{Xt} = R_{Xt_TEST} - 0.009 \quad \text{eq. 3.28}$$

[0073] 등식 3.28에서, R_{Xt_TEST} 는 다음의 등식을 사용하여 결정될 수 있으며, 여기서 $MaxT_{caseX}$ 는 케이스 X의 서모커플들(500)(도 5)로부터 얻어진 최대 온도를 나타낸다:

[0074]
$$R_{Xt_TEST} = (maxT_{caseX} - T_{air}) / (V_{cel1X} + V_{ce2X}) * I_o \quad \text{eq. 3.29}$$

[0075] 상기 테스트 데이터로부터 계산된 열저항들에 대해 전술한 보정 인자가 적용될 수 있다. 이들 결과들의 요약이 아래의 표 5 및 표 6에 제공되어 있다.

표 5

SCFM/AMPs	R_{Ct_inv}	$R_{Ct_hb_CA}$	$R_{At_hb_CA}$	$R_{Bt_hb_BC}$	$R_{Ct_hb_BC}$
200/200	0.048233	0.045197405	0.056646	0.050254	0.041742
60/100	0.105912	0.090516506	0.120405	0.103475	0.086043

[0076]

표 6

	$R_{Ct_inv} - R_{Ct_hb_B}$	$R_{Ct_inv} - R_{Ct_hb_C}$	$R_{Ct_hb_C} - R_{At_hb_CA}$	$R_{Ct_hb_BC} - R_{Bt_hb_BC}$	$R_{Bt_hb_BC} - R_{Ct_hb_BC}$	$R_{At_hb_CA} - R_{At_hb_CA}$
	C	A				
SCFM/AMPs	RCA	RCB	RC	RC2	RB	RA
200	0.006491	0.003035	0.038707	0.038707	0.047219	0.050155
60	0.019869	0.015395	0.070647	0.070647	0.088079	0.100536

[0077]

[0078] 표 5는 보정 인자가 적용된 테스트 데이터로부터 계산된 열저항들을 나타낸다. 등식들 3.22 내지 3.25를 표 5의 값들에 적용하는 것은 표 6에 나타난 열저항들을 산출한다. 표 6에 나타난 값들을 검증하기 위해, 열저항들 RCA, RCB, RC, RB, 및 RA이 사용되어 도 4d에 나타난 테스트 구성에 대한 추정된 온도 판독치들을 계산할 수 있다. 그 후에, 추정된 온도 판독치들은 도 4d에 나타난 테스트 구성에 대한 측정된 온도 판독치들과 비교될 수 있다. 추정된 온도 판독치들은 예를 들어, 표 6으로부터의 테스트 값들을 사용하여 등식들 3.1 내지 3.3에 따라 프로그래밍된 Matlab® 컴퓨터 모델을 사용하여 컴퓨터 모델링될 수 있다. 검증의 결과들이 아래의 도 6a 내지

도 6f와 관련하여 논의되어 있다.

[0079] 도 6a 내지 도 6f는 도 4d에 나타난 테스트 구성을 사용하여, 시간에 따라 측정 온도들과 컴퓨터 모델링된 온도들을 비교한 것을 나타낸 그래프들이다. 도 6a 내지 도 6f에서, 컴퓨터 모델링된 온도들은 표 6으로부터의 열저항들에 대한 실제(평균화된 것이 아닌) 테스트 값들과 Vce에 대한 테스트 데이터를 사용하여 계산되었다. 또한, 상기 열 임피던스들(CX와 병렬인 ZX=RX)의 열용량들은 다음의 값들로 설정되었다: CA=2288J/℃, CB=2565J/℃, CC=3077J/℃, CCA=17,388J/℃, CCB=30,573J/℃. 열용량들이 도 7a 및 7b와 관련하여 아래에서 더 기술되어 있다.

[0080] 도 6a 내지 도 6c는 200 SCFM의 공기 흐름 및 200 암페어의 전류 Io에 대해 결정된 컴퓨터 모델링된 온도들과 측정된 온도들을 비교하고 있다. 도 6a는 위상 A 아래에 있는 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도, Tcase의 그래프를 나타낸다. 도 6b는 위상 B 아래에 있는 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도, Tcase의 그래프를 나타낸다. 도 6c는 위상 A 아래에 있는 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도, Tcase의 그래프를 나타낸다. 마찬가지로, 도 6d 내지 도 6f는 60 SCFM의 공기 흐름 및 100 암페어의 전류 Io에 대해 결정된 컴퓨터 모델링된 온도들과 측정된 온도들을 비교하고 있다. 도 6d는 위상 A 아래에 있는 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도, Tcase의 그래프를 나타낸다. 도 6e는 위상 B 아래에 있는 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도, Tcase의 그래프를 나타낸다. 도 6f는 위상 A 아래에 있는 가장 뜨거운 지점의 케이스 온도, Tcase의 그래프를 나타낸다.

[0081] 도 6a 내지 도 6f의 각각에서, 측정된 온도들은 실선(602)으로 나타나 있으며, 컴퓨터 모델링된 온도들은 점선(604)으로 나타나 있다. 도 6a 내지 도 6f에 도시된 바와 같이, 측정된 온도들 및 컴퓨터 모델링된 온도들은 매우 근접해 있다. 구체적으로, 측정된 온도들과 컴퓨터 모델링된 온도들 간의 차이는 대략 0.4 내지 4.4 도 셀시우스(℃) 사이에서 달라진다. 따라서, 전술한 열적 모델 및 열저항들은 듀얼 H-브리지(200)에서의 온도 모델링을 위한 적절한 방법을 제공한다는 것이 인식될 것이다.

[0082] 일 실시예에서, 회귀 기술들(regression techniques)은 냉각 공기의 흐름율의 함수로서 열저항들 RCA, RA, RC, RBC, 및 RB에 대한 등식들을 도출하는데 사용될 수 있다. 테스트 데이터는 도 4a 내지 도 4c에 나타난 각 테스트 구성들을 위해 수집될 수 있다. 각 테스트 구성에 있어서, 열적 테스트들은 200A, 100A 및 50A의 전류 Io 그리고 200, 150, 100, 60, 35 및 0 SCFM의 공기흐름에서 수행될 수 있다. 또한, 상이한 듀얼 H-브리지들 사이의 파트-투-파트 편차(part-to-part variation)를 찾기 위해, 5개의 추가적인 듀얼 H-브리지 모듈이 공기흐름 200 SCFM 그리고 200A, 100A 및 50A에서 테스트 되었다. 이들 테스트들로부터 수집된 데이터가 아래의 표 1 내지 표 14에 나타나 있다. 표 8, 10, 12, 14, 16, 18, 및 20에서, 라벨들 S1, S2, S3, S4, S5, 및 S6은 테스트들에서 사용된 상이한 모듈들에 대해 수집된 데이터를 나타낸다.

표 7

RBt_inv

RBt_inv SCFM	200	100	50	AVERAGE	minus 0.009 RBt_inv
200	0.0576757	0.05722534	0.0535175	0.05614	0.04714
150	0.0677738	0.06649913	0.0680296	0.06743	0.05843
100	0.085742	0.0838515	0.0832042	0.08427	0.07527
60		0.11603032	0.1128681	0.11445	0.10545
35		0.16623343	0.1641608	0.16520	0.15620
0		not equalized	0.9165984	0.91660	0.90760

[0083]

표 8

RCt_inv (200 SCFM에서)

RCt_inv at 200 SCFM					minus 0.009
	200	100	50	AVERAGE	RCt_inv
S1	0.05723	0.05750	0.05404	0.05626	0.04726
S2	0.05751	0.05782	0.05530	0.05688	0.04788
S3	0.05764	0.05502	0.05351	0.05539	0.04639
S4	0.05838	0.05850	0.05419	0.05702	0.04802
S5	0.05793	0.05769	0.05613	0.05725	0.04825
S6	0.05874	0.05647	0.05686	0.05736	0.04836

[0084]

표 9

RCt_inv

RCt_inv					minus 0.009
SCFM	200	100	50	AVERAGE	RCt_inv
200	0.057232732	0.057501876	0.054042963	0.05626	0.04726
150	0.06649584	0.065972495	0.067532177	0.06667	0.05767
100	0.082823	0.082282327	0.081988819	0.08236	0.07336
60		0.114911991	0.11265315	0.11378	0.10478
35		0.164402984	0.164444504	0.16442	0.15542
0		not equalized	0.923550337	0.92355	0.91455

[0085]

표 10

RAI_inv (200 SCFM에서)

RAI_inv at 200 SCFM					minus 0.009
	200	100	50	AVERAGE	RAI_inv
S1	0.064074	0.065422	0.062862	0.064120	0.05512
S2	0.063884	0.065484	0.064512	0.064627	0.05563
S3	0.064531	0.0634	0.062545	0.063491	0.05449
S4	0.064364	0.065815	0.062237	0.064138	0.05514
S5	0.063778	0.064906	0.064362	0.064349	0.05535
S6	0.058187	0.064651	0.066080	0.062972	0.05397

[0086]

표 11

RAI_inv

RAI_inv					minus 0.009
SCFM	200	100	50	AVERAGE	RAI_inv
200	0.0640738	0.06542199	0.0628625	0.06412	0.05512
150	0.073421	0.07486458	0.0768599	0.07505	0.06605
100	0.094100	0.09847793	0.0983238	0.09697	0.08797
60		0.12670651	0.1283553	0.12753	0.11853
35		0.16580480	0.1741297	0.16997	0.16097
0		not equalized	0.9114758	0.91148	0.90248

[0087]

표 12

RBt_{inv} (200 SCFM에서)

RBt _{inv} at 200 SCFM					minus 0.009
	200	100	50	AVERAGE	RA _{t inv}
S1	0.057676	0.05723	0.05352	0.05614	0.04714
S2	0.058040	0.05731	0.05472	0.056691	0.04769
S3	0.057548	0.05484	0.05309	0.055158	0.04616
S4	0.057223	0.05602	0.05363	0.055625	0.04662
S5	0.056408	0.05525	0.05449	0.055385	0.04638
S6	0.058187	0.05633	0.05616	0.056892	0.04789

[0088]

표 13

RC_{t hb} CA-TEST

RC _{t hb} CA TEST					minus 0.009
SCFM	200A	100A	50A	AVERAGE	RC _{t hb} CA
200	0.05420	0.05406	0.05202	0.05342	0.04442
150	0.06156	0.06087	0.06010	0.06084	0.05184
100	0.07443	0.07423	0.07122	0.07329	0.06429
60		0.09952	0.09764	0.09858	0.08958
35		0.13827	0.13349	0.13588	0.12688
0			0.59907	0.59907	0.59007

[0089]

표 14

RC_{t hb} CA TEST (200 SCFM에서)

RC _{t hb} CA TEST at 200 SCFM					minus 0.009
	200A	100A	50A	AVERAGE	RC _{t hb} CA
S1	0.05420	0.05406	0.05202	0.05342	0.04442
S2	0.05531	0.05546	0.05319	0.05466	0.04566
S3	0.05287	0.05273	0.05320	0.05293	0.04393
S4	0.05511	0.05552	0.05324	0.05462	0.04562
S5	0.05585	0.05612	0.05679	0.05625	0.04725
S6	0.05471	0.05474	0.05453	0.05466	0.04566

[0090]

[0091]

등식들 3.22 내지 3.77에서, RA, RB, RC, RBC, 및 RCA를 계산하는데 사용된 파라미터들은 RC_{t inv}, RB_{t hb BC}, RC_{t hb BC}, RA_{t hb CA} & RC_{t hb CA}이다. 상이한 듀얼 H-브리지들 사이의 이들 파라미터들의 파트-투-파트 편차는 통계 분석을 사용하여 기술될 수 있다. 예를 들어, 표 8, 10, 12, 14, 16, 18, 및 20에 나타난 데이터는 Minitab®과 같은 통계적 모델링 패키지(statistical modeling package)로 입력될 수 있다. 이들 파라미터들에 대한 통계 데이터가 아래의 표 21에 나타나 있다.

표 21

Parameter	N	Mean	Median	TrMean	StDev	SE Mean
RCt inv	6	0.04769	0.04795	0.04769	0.00075	0.00030
RBt hb BC	6	0.04627	0.04552	0.04627	0.00186	0.00076
RCt hb BC	6	0.04174	0.04190	0.04174	0.00065	0.00026
RAt hb CA	6	0.05671	0.05628	0.05671	0.00117	0.00048
RCt hb CA	6	0.04542	0.04564	0.04542	0.00116	0.00047

[0092]

[0093]

상기 통계 데이터는 각 파라미터들 RCt_inv, RBt_hb_BC, RCt_hb_BC, RAt_hb_CA & RCt_hb_CA의 각각에 대한 규격 상한(upper specification limit; USL) 및 그 결과 구해진 열저항들 RA, RB, RC, RBC, 및 RCA에 대한 규격 상한을 결정하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, 등식들 3.22 내지 3.27 및 표 21에 나타나 있는 열저항 파라미터들에 대해 계산된 평균(mean) 및 표준 편차(standard deviation)들을 사용하여, 몬테카를로 분석(Monte Carlo analysis)과 같은 통계 분석이 적용됨으로써 200 SCFM에서의 RA, RB, RC, RBC, RCA에 대한 평균(μ) 및 표준 편차(σ)를 획득할 수 있다. 200 SCFM에서의 각 열저항 RA, RB, RC, RBC, RCA에 대한 평균 및 표준 편차는 다음의 등식을 사용하여 200 SCFM에서의 각각의 열저항들에 대한 USL을 계산하는데 사용될 수 있다.

[0094]

$$Z = (USL - \mu) / \sigma$$

[0095]

상기 등식에서, Z는 규격 상한과 평균 값 사이에 적합할 수 있는 표준 편차들의 개수를 나타내며, USL, μ , 및 σ 는 200 SCFM에서의 특정 열저항 파라미터 RA, RB, RC, RBC, RCA에 대한 규격 상한, 평균, 및 표준 편차를 나타낸다. Z = 3을 사용하여 USL에 대한 해를 구하면 다음과 같다:

[0096]

$$USL = \sigma * 3 + \mu$$

[0097]

3의 Z 값을 사용하는 것은 큰 파트-투-파트 편차를 수용하기에 충분히 강건하다는 것을 보장한다. 표 21에서, 각 열저항(RA, RCA, RC 등)의 평균(μ) 및 표준 편차(σ)는 200SCFM 냉각에 대해 확인되었다. 이들 값과 Z=3을 사용하면, USLRXX_200SCFM이 확인될 수 있다. 이어서, $K1 = \mu_0/RXX200SCFM$, $K2 = USLRXX200SCFM/RXX200SCFM$ 및 $K3 = \sigma_0/RXX200SCFM$ 의 비율이 확인될 수 있다. 이들 비율, 등식들 3.22 내지 3.27 그리고 표 7, 9, 11, 13 및 21로부터의 데이터를 사용하여, 모든 테스트된 냉각 조건들에서의 USLRXX가 확인될 수 있다. 열저항 값 RCA의 예시적인 계산이 아래의 표 22 및 23에 나타나 있다. 이 예에서, 열저항 RCA에 대한 통계 분석은 표 21로부터의 데이터를 사용하여, 0.05092의 200SCFM에서의 평균(μ) 및 0.00153의 200SCFM에서의 표준 편차(σ)를 제공하고 있다. 이들 값들은 아래에 나타나 있는 표 22 및 23의 예시적 계산들에서 사용되었다.

표 22

6개 샘플로부터의 통계 결과		$Z * \sigma_0 + \mu_0$	$\mu_0 / RCA_{200 SCFM}$	$USL / RCA_{200 SCFM}$	$\sigma_0 / RCA_{200 SCFM}$
μ_0	σ_0	USL for Z=3	K1	K2	K3
0.00578	0.00099	0.00875	0.890996	1.348825786	0.152610003

[0098]

표 23

				RCA*K1	RCA*K2	RCA*K3	(USL-μ)/σ
SCFM	RCt inv	RCt hb CB	RCA	μ	USLRCA	σ	Z
200	0.047259	0.040772	0.006487	0.00578	0.008750	0.0009900	3
150	0.057667	0.049078	0.008588	0.00765	0.011584	0.0013107	3
100	0.073365	0.061302	0.012063	0.01075	0.016271	0.0018409	3
60	0.104783	0.085042	0.019740	0.01759	0.026626	0.0030126	3
35	0.155424	0.123927	0.031496	0.02806	0.042483	0.0048067	3
0	0.914550	0.704386	0.210164	0.18726	0.283475	0.0320732	3

[0099]

[0100] 각각의 열저항들, RA, RB, RC, RBC, 및 RCA에 대해 전술한 것과 동일한 방법을 사용함으로써 아래의 표 24에 나타나 있는 USL 값들을 제공한다.

표 24

SCFM	RCA	RA	RC	RBC	RB
200	0.008750	0.055510	0.044130	0.006450	0.050850
150	0.011584	0.064519	0.051292	0.013248	0.057547
100	0.016271	0.084447	0.067135	0.020643	0.071985
60	0.026626	0.112248	0.085785	0.034592	0.094386
35	0.042483	0.139661	0.111029	0.064947	0.128310
0	0.283475	0.477457	0.379574	0.738187	0.458063

[0101]

[0102] 각각의 열저항, RA, RB, RC, RBC, 및 RCA에 대해 획득된 USL 값들은, 그 후에 각 열저항들에 대한 회귀 등식들을 도출하는데 사용될 수 있다. 예를 들어, USL 값들에 대해 회귀 기술들이 적용됨으로써, 히트싱크를 냉각시키는데 사용된 공기 흐름률의 함수로서 상기 각 열저항의 USL을 계산하기 위한 등식들을 도출할 수 있다. 표 24의 예시적 데이터에 대해 회귀 기술을 적용함으로써 다음의 회귀 등식들이 제공된다:

[0103]
$$RCA = -0.02328 + 0.30685 / (1 + ((SCFM/2.216)^{0.487}))$$
 eq. 3.30

[0104]
$$RA = -0.05826 + 0.5357 / (1 + ((SCFM/10.98)^{0.46}))$$
 eq. 3.31

[0105]
$$RC = -0.0145 + 0.394 / (1 + ((SCFM/9.158)^{0.568}))$$
 eq. 3.32

[0106]
$$RBC = -0.01547 + 0.7537 / (1 + ((SCFM/2.198)^{0.779}))$$
 eq. 3.33

[0107]
$$RB = 0.045607 + 0.12515 * \exp(-SCFM/65.1) + 0.291 * \exp(-SCFM/10.6)$$
 eq. 3.34

[0108] 일 실시예에서, 각각의 위상들에 대한 열용량들이 결정될 수 있다. 각 위상의 열용량들을 결정하기 위해, 도 4b 및 도 5에 도시된 테스트 구성을 사용하여 열적 테스트 온도들이 획득될 수 있다. 구체적으로, 도 4b에 관해 기술된 바와 같이 전류 Io 가 위상 B 및 위상 C 듀얼 IGBT 모듈들에 대해 인가될 수 있다. 온도 측정들은 히트싱크로 계속하여 공기흐름을 공급하면서 전류 Io가 턴 오프된 이후에 취해질 수 있다. 일 실시예에서, 열 냉각 테스트 동안의 공기 흐름률은 150 SCFM 및 Io=200A로 설정될 수 있다. 열적 테스트 측정들은 일련의 열 냉각 곡선들을 규정한다. 150 SCFM 및 Io=200A 테스트들에 대한 열 냉각 곡선들을 사용하여, 히트싱크의 열적 시간 상수 Tau 가 위상 B의 열 임피던스에 대해 151 초라는 것이 확인되었다. 그 후에, RBt에 병렬로 위치된 열용량 CB가 다음의 공식을 사용하여 결정될 수 있다:

[0109]
$$Tau = RBt * CB$$

[0110] 0.058868 °C/W의 150 SCFM(RBt_hb_BC_TEST - 0.009)에서 평균 RBt 값을 적용하는 경우, CB에 대한 해는 다음을 따른다:

[0111]
$$CB = 151 / 0.058868 = 2565 \text{ J} / ^\circ\text{C}$$

[0112] 상기 등식에서, RBt의 값은 USL 값이 아니라 표 17에 나타난 바와 같은 측정된 테스트 데이터라는 것에 유의해야 한다. 또한, 시간의 함수로서 테스트 냉각 곡선을 기술하는 등식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

$$[0113] \quad \text{deltaTB} = (33.8 - 0.8) * \exp(-t/151) + 0.8$$

[0114] 상기 공식에서, t는 시간이며, deltaTB는 주어진 시간 t에 대한 위상 B 아래의 온도 변화를 나타낸다. 테스트 데이터로부터 취해진, 33.8 °C는 t=0에서의 개시 온도이며, 0.8 °C는 냉각 곡선의 최종 온도(오프셋)이다. 상기 공식은 냉각 곡선이 지수함수 형식을 가진다는 가정에 기초하고 있다. 상기 등식은 시간 t에 따른, 위상 B의 추정 온도 TB 마이너스 유입 공기의 온도 Tinlet를 나타내는 추정 냉각 곡선을 계산하는데 사용될 수 있다. 도 7a에 나타난 바와 같이, 결과적으로 구해진 곡선은 측정 냉각 곡선과 비교됨으로써 그것의 가정된 지수 거동(exponential behavior)을 입증할 수 있다.

[0115] 도 7a는 추정된 위상 B 냉각 곡선을 측정된 위상 B 냉각 곡선과 비교하는 그래프이다. 구체적으로, y-축은 위상 B의 온도 TB 마이너스 유입 공기의 온도 Tinlet를 °C로 나타내고 있다. x-축은 시간 t를 초 단위로 나타내고 있다. 도 7a의 그래프에서, TB-Tinlet에 대한 측정 냉각 곡선은 실선(702)으로 나타나 있으며, TB-Tinlet에 대한 추정 냉각 곡선은 점선(704)으로 나타나 있다. 도 7a의 그래프에 기초하면, 추정 냉각 곡선이 측정 냉각 곡선에 근접하게 들어맞는다는 것이 인식될 것이다. 또한, 동일한 시간 상수 tau는 도 7b에 나타난 바와 같은 위상 C에 대한 추정 냉각 곡선을 계산하는데 적용될 수도 있다.

[0116] 도 7b는 추정된 위상 C 냉각 곡선을 측정된 위상 B 냉각 곡선과 비교하는 그래프이다. 구체적으로, y-축은 위상 C의 온도 TC 마이너스 유입 공기의 온도 Tinlet를 °C로 나타내고 있다. x-축은 시간 t를 초 단위로 나타내고 있다. 도 7b의 그래프에서, TB-Tinlet에 대한 측정 냉각 곡선은 실선(702)으로 나타나 있으며, TB-Tinlet에 대한 추정 냉각 곡선은 점선(704)으로 나타나 있다. 도 7b의 그래프에 기초하면, 추정 냉각 곡선이 측정 냉각 곡선에 근접하게 들어맞는다는 것이 인식될 것이다. 따라서, 위상 B로부터 도출된 동일한 시간 상수 Tau는 위상 C의 냉각을 예측하는데도 또한 적용될 수 있다. 모든 3개의 위상들은 각 위상에 대해 동일한 열용량을 제공하는 동일한 히트싱크에 커플링되어 있기 때문에, 열적 시간 상수 Tau는 모든 위상들에 대해 당연히 동일하다.

[0117] 상술한 바를 기초로 하면, 주어진 공기 흐름률에서 열적 시간 상수 Tau는 각 위상에 대해 동일하다는 것이 인식될 것이다. 또한, Tau는 다음의 공식에 따라 결정될 수 있으며, 여기서 Rth는 열저항을 나타내고, Cth는 열용량을 나타낸다:

$$[0118] \quad \text{Tau} = \text{Rth} * \text{Cth}$$

[0119] 열용량 Cth에 대한 해는 다음을 따른다:

$$[0120] \quad \text{Cth} = \text{Tau} / \text{Rth}$$

[0121] 듀얼 H-브릿지가 상이한 공기 흐름률에 따라 작동되는 경우, 각 위상의 열용량 Cth는 일정한 상태를 유지하지만, Tau와 Rth는 달라지게 된다. 따라서, CB는 임의의 공기 흐름률에 대해 2565 J/°C이 되지만, RBt는 RBt(150SCFM)로부터 달라지게 되며, 이에 따라 Tau는 151 초로부터 달라지게 된다. 상이한 위상들에 있어서 150 SCFM의 공기 흐름률에서는, Tau가 151 초를 유지하고 있다는 것이 나타나 있다. Rat는 RBt와 다르며 또한 이것은 RCt와 다르기 때문에, CB는 CC와 다르게 되며 또한 CA와 다르게 된다. 위상 C 및 위상 A 열용량들인, CC 및 CA에 대한 해는 다음을 따른다:

$$[0122] \quad \text{CC} = \text{Tau}/\text{RCt_hb_BC_TEST} - 0.009 = 151/0.049078 = 3077 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

$$[0123] \quad \text{CA} = \text{Tau}/\text{Rat_hb_CA_TEST} - 0.009 = 151/0.065987 = 2288 \text{ J/}^\circ\text{C}$$

[0124] 상기와 같이 생성된 열 임피던스 모델들을 사용함으로써, 각종 부하 조건들 및 공기 흐름률 하에서 듀얼 H-브릿지의 각 위상들에 적용가능한 열저항들 및 열용량들에 대한 값들이 결정될 수 있다. 이들 값들은 그 후에 정상 작동 중인 듀얼 H-브릿지의 열적 거동을 예측하는데 사용될 수 있다. 정상 작동 중인 듀얼 H-브릿지의 열적 거동을 예측할 수 있기 때문에 듀얼 H-브리지 및 관련 제어 회로에 대한 다수의 유용한 개선들을 가능하게 할 수 있다. 예를 들어, 도 21 내지 도 24를 참조하여 아래에서 더 기술되는 바와 같은, 개선된 환기 및 과온 보호 기술들이 개발될 수 있다. 여러 가지의 적절한 열 임피던스들을 추정하는 등식들을 확인함으로써, 각 위상의 전력 소모를 추정하고, 또한 그 둘을 조합하여, 각 위상의 IGBT의 접합온도를 추정하는 프로세스를 생성하도록 한다.

[0125] **접합 온도 추정 모델들**

[0126] 도 8은 실시예들에 따른, 듀얼 H-브릿지를 사용하는 시스템의 블록도이다. 도 8에 도시된 바와 같이, 듀얼 H-브

리지의 위상 A(202)의 출력은 변압기(804) 및 한쌍의 실리콘 제어 정류기들(SCRs)(806)을 통해, 계자 권선(802)에 커플링되어 있다. 듀얼 H-브리지의 위상 C(206)의 출력은 변압기(810) 그리고 다이오드들(812), 커패시터(814), 및 인덕터(816)와 같은 배터리 충전 회로를 통하여, 배터리(808)에 커플링되어 있다. 위상 B 출력은 배터리(808)와 계자 권선(802) 양쪽 모두에 대해 공통이며, 변압기들(804 및 810) 양쪽 모두에 커플링되어 있다. 위상 A IGBT들의 출력 전압은 여기서 V_a 로 지칭되며, 위상 B IGBT들의 출력 전압은 여기서 V_b 로 지칭되며, 위상 C IGBT들의 출력 전압은 여기서 V_c 로 지칭된다. 도 8에 도시된 듀얼 H-브리지 구성은 계자 권선(802)에 대해서만 전압 저감이 사용되지만, 배터리(808)와 계자 권선(802)에 대한 DC 입력 전압, V_{link} 의 저감 및 분리 모두를 제공한다. 작동 중에 있어서, IGBT들이 스위칭 됨으로써 도 9에 도시된 파형들을 생성할 수 있다.

[0127] 도 9는 위상 A, 위상 B, 및 위상 C IGBT들의 출력 전압들의 그래프이다. 도 9의 그래프에서, 선(902)은 위상 B의 전압 출력, V_{b+} 을 나타낸다. 위상 A 또는 B의 전압 출력은 선(904)으로 나타나 있고, V_{j+} 로 지칭되며 여기서 j 는 A 또는 B 일 수 있다. V_{b+} 와 V_{j+} 의 차이값은 변압기(어떤 위상이 활성화인지에 따라 결정되는 변압기(804 또는 810))의 일차 권선의 전압이고, 여기서는 V_{prim} 으로 지칭되며 선(906)으로 나타나 있다. 일 실시예에서, 출력 파형들 모두의 구간 T(908)은 대략 1/600 초일 수 있다. 선(910)으로 지칭된 시간 t_{on} 은 대응 IGBT가 스위치 온 되어 출력 전류가 변압기(804 또는 810)로 흐르게 하는 시간을 나타낸다.

[0128] 도 10은 도 9의 출력 전압들 위에 겹쳐진 예상 출력 전류의 그래프이다. 도 10의 그래프에서, 점선(1002)은 위상 B의 전류 출력 I_{b+} 을 나타낸다. 위상 A 또는 B의 전류 출력은 점선(1004)으로 표시되어 있고, I_{j+} 로 지칭되며 여기서 j 는 A 또는 B일 수 있다. I_{b+} 와 I_{j+} 의 합은 변압기(어떤 위상이 활성화인지에 따라 결정되는 변압기(804 또는 810))의 일차 권선의 전류이고, 여기서는 I_{prim} 으로 지칭되며 선(1006)으로 나타나 있다. 또한, 음영 영역들은 모듈의 프리휠링 다이오드(208)에서의 전류를 나타낸다. 일 실시예에서, IGBT들(104)과 다이오드들(208)의 전류 파형의 특성들은 각 위상의 IGBT들(104)의 쌍에서의 균등하지 않은 전력 손실을 예측하는 모델을 제공하기 위해 결정될 수 있다. 도출된 전력 손실 모델에 기초하여, 각 위상에 대한 IGBT들(104)의 접합 온도가 모델링될 수 있다.

[0129] 도 11은 단일 H-브리지에서의 출력 전류의 그래프이다. 도 11의 그래프는 도 1 및 도 8과 관련하여 도시되어 있으며, 여기서 출력(112)(도 1)은 변압기(804 또는 810)(도 8)의 일차 권선에 커플링될 수 있다. 도 1에 나타난 H-브리지(100)와 같은 H-브리지 구성이 주어지는 경우, 출력(112)에서의 평균 부하 전류는 변압기(804 또는 810)의 이차 권선의 평균 전류와 같게 되며, 이것은 측정을 통해 판정될 수 있다. 알려진 평균 부하 전류를 사용함으로써, 변압기의 일차 권선의 평균 전류가 다음의 등식에 의해 얻어질 수 있다:

[0130]
$$I_{pr_average} = (I_{load_av} / n) + I_{magn} \quad \text{eq. 4.1}$$

[0131] 상기 등식에서, $I_{pr_average}$ 는 변압기(804 또는 810)의 일차 권선의 평균 전류를 나타내고, n 은 변압기의 권선비이며, I_{magn} 은 변압기(804 또는 810)의 자화 전류(magnetizing current)를 나타낸다. 일 실시예에서, n 은 배터리(808)에 대응하는 변압기(810)에 대해 대략 2.875이며, 또한 n 은 계자 권선(802)에 대응하는 변압기(804)에 대해 대략 6.33이다. 또한, 자화 전류 I_{magn} 은 양쪽 모두의 변압기들(804 및 810)에 대해 대략 30 암페어일 수 있다. 변압기(804 또는 810)의 일차 권선에서의 평균 전류가 도 11에 선(1102)으로 나타나 있다.

[0132] 또한, 단일의 구간 T, 변압기의 일차 권선의 평균 전류 $I_{pr_average}$ 는 H-브리지의 2개의 위상들 사이에서 나누어지게 되며, 선(1104)로 나타난 $I_{phase\ 1_average}$ 과 선(1106)으로 나타난 $I_{phase\ 2_average}$ 을 따른다. 따라서, 전체 구간 T 동안의 단일 위상에 대한 평균 전류는 $I_{pr_average}$ 의 절반이 되고, 이것은 I_k 로 지칭되며 선(1108)로 나타나 있다. 또한, 단일 위상에 대한 전류 파형의 실제 형상은 선(1108 및 1110)으로 나타나 있으며, 여기서 선(1108)은 IGBT(104)의 전류를 나타내고 선(1110)은 다이오드(208)의 전류를 나타낸다. 이하, 도 12 내지 도 15를 참조하여, 듀얼 H-브리지(200)의 위상 A 및 위상 C에 대한 전류 파형을 더 설명한다.

[0133] 도 12a는 위상 A 또는 위상 C IGBT(104)에 대한 전류 파형의 그래프이다. 도 12a에 도시된 바와 같이, 전류 파형은 속도 a 로 상승하는 전류로 특징지어진 제 1 부분(1202) 및 속도 b 로 상승하는 전류로 특징지어진 제 2 부분(1204)을 포함할 수 있다. 속도 a 및 속도 b 는 다음의 등식들을 사용하여 얻어질 수 있다:

[0134]
$$a = di/dt = V_{dc} / [L_{leak}] \quad \text{eq. 4.2}$$

[0135]
$$b = di/dt = V_{dc} / [L_{leak} + L_{magn} || L_{load} * n^2] \quad \text{eq. 4.3}$$

[0136] 상기 등식들에서, L_{leak} 은 변압기 804(약 29uH) 또는 810(약 23 uH)의 일차 권선의 누설 인덕턴스를 나타내고, L_{magn} 은 변압기 804(약 26mH) 또는 810(약 4.9mH)의 자화 인덕턴스이고, L_{load} 는 변압기 804(약 0.22H) 또

는 810(약 1mH)에 의해 보여지는 부하의 인덕턴스이며, n 은 변압기(804 또는 810)의 권선비(도 8 참조)이다. 배터리(808)에 대응하는 위상 C IGBT들에 대해 계산된, 속도 a 및 속도 b 의 일 예가 표 25에 나타나 있다. 계자 권선(802)에 대응하는 위상 A IGBT들에 대해 계산된, 속도 a 및 속도 b 의 일 예가 표 26에 나타나 있다.

표 25

배터리

I _{batt} (A)	V _{dc} (V)	a (A/s)=V _{dc} / L _{leak Prim} [A/sec]	b (A/s)= V _{dc} / L _b [A/sec]	a/b
225	250	10995294.01	80875.96	135.95
380	400	17592470.42	129401.54	135.95
380	500	21990588.03	161751.93	135.95
380	800	35184940.85	258803.08	135.95
380	900	39583058.45	291153.47	135.95
380	1000	43981176.06	323503.85	135.95
380	1100	48379293.66	355854.24	135.95
380	1200	52777411.27	388204.62	135.95
380	1300	57175528.87	420555.01	135.95
380	1500	65971764.08	485255.78	135.95

[0137]

표 26

필드(Field)

I _{field} (A)	V _{field} (V)=0.161* I _{field}	V _{dc} (V)	a (A/s)=V _{dc} / L _{leak Prim} [A/sec]	b (A/s)= V _{dc} / L _b [A/sec]	a/b
125	20.13	250	8611780.92	9752.48	883.04
200	32.20	400	13778849.47	15603.96	883.04
325	52.33	700	24112986.57	27306.93	883.04
400	64.40	875	30141233.21	34133.67	883.04
400	64.40	1300	44781260.76	50712.88	883.04
125	20.13	1500	51670685.50	58514.86	883.04

[0138]

[0139]

표 25 및 26에 나타나 있는 속도 a 및 속도 b 에 대한 결과들에 기초할 경우, 링크 전압 V_{dc}(102)(도 8)의 모든 값들에 있어서, a 가 b 보다 훨씬 더 크다는 것을 알 수 있다. 이에 따라, 도 12a에 나타난 전류 파형은 도 12b에 나타난 전류 파형으로 단순화될 수 있다. 도 12b에 나타난 바와 같이, 제 1 부분(1202)의 기울기는 무한대인 것으로 가정된다.

[0140]

도 13a 내지 도 13c는 위상 B의 IGBT들(104)과 다이오드들(208)에 대한 전류 파형들을 나타내는 그래프들이다. 도 10을 참조하면, 선(1006)으로 나타난 I_{prim} 는 어떤 위상이 활성화되어 있는지에 따라 위상 A 또는 위상 C 중의 어느 하나의 일차 권선에서의 전류를 나타낸다. 위상 B가 공통이기 때문에, I_{prim}의 +ve 부분이 B+ IGBT를 통과하여 흐르며 I_{prim}의 -ve 부분이 B- IGBT를 통과하여 흐른다는 것이 인식될 것이다. 위상 B에서의 전류의 형상은 도 13a 내지 도 13c로 도시될 수 있다.

[0141]

도 13a에 나타난 바와 같이, IGBT가 스위치 온 되는 시점($t=0$)에서 IGBT의 전류가 I_x(1302)로 상승한다. IGBT(104)의 온 시간 t_{on} 동안, IGBT(104)의 전류는 속도 b 로 I_y(1304)까지 상승한다. 시간 t_{on} (910)에서 IGBT(104)가 스위치 오프된 이후에는, IGBT(104)의 전류가 0 으로 떨어지며 다이오드(208)의 전류는 I_y(1304)로 상승한다. 그 후에, 다이오드의 전류는 속도 $-b$ 로 0으로 떨어지며, 선(1306)으로 지칭되는 시간 t_3 의 통과 후에는 0에 도달한다. 위상 B의 IGBT를 통과하는 평균 전류는 다음의 등식을 사용하여 결정될 수 있다:

- [0142] $I_{Bave} = I_o \cdot t_{on} + I_{od} \cdot [\text{다른 위상들의 다이오드에 전류가 흐르는 시간}]$ eq. 4.4
- [0143] 상기 등식에서, I_{Bave} 는 위상 B를 통과하는 평균 전류이고, I_o 는 t_{on} 동안 위상 A 또는 C에서의 IGBT들의 평균 전류인 I_x & I_y 의 평균이다. I_{od} 는 다이오드가 온 인 시간 동안 위상 A 또는 C로 다이오드를 통과하는 평균 전류이다. 두 경우 모두에 있어서, 이 전류는 또한 위상 B의 IGBT를 통과한다.
- [0144] -b의 하락률 di/dt 은 고정되어 있으므로, 다이오드 전류의 형상에 대한 3개의 시나리오가 가능하다. 여기에서 사용되는, t_3 는 절반 구간 $T/2$ 마이너스 IGBT가 온 인 시간 t_{on} 이다. 또한, (선(1308)으로 지칭된) t_f 는 I_y (다이오드의 초기 전류)가 0으로 줄어드는데 걸리는 시간으로 규정되며, I_y/b 이 된다. 시간 t_4 (미도시)는 다이오드가 전류를 흐르게 하는 t_3 동안의 시간으로 규정된다. 또한, t_z (미도시)는 듀얼 IGBT에서 다른쪽 IGBT(104)가 스위치 온 되는 시점에서 다이오드의 전류의 크기로 규정된다. 제 1 시나리오가 도 13a에 도시되어 있으며, 이것은 다이오드 전류가 절반 구간 $T/2$ 에서 0에 도달하는 케이스를 나타낸다. 즉, $t_4 = t_3 = t_f$ 이 된다. $T/2$ 에서, 듀얼 IGBT의 다른쪽 IGBT(104)가 스위치 온 된다. 도 13a에 도시된 시나리오에서, 듀얼 IGBT의 다른쪽 IGBT(104)가 스위치 온 되는 시점에서 다이오드에는 잔존 전류가 존재하지 않는다. 즉, $t_z = 0$ 이 된다. 또한, I_{pr_diode} 는 $t_f = t_3$ 에서 최대가 된다는 것이 인식될 것이다.
- [0145] 도 13b는 다이오드 전류에 대한 제 2 시나리오를 나타내며, 여기서 t_f 는 t_3 미만이다. 도 13b에 나타낸 시나리오에서, $t_4 = t_f$ 이며 $I_z = 0$ 이다. 따라서, 양쪽 모두의 위상들 A 및 C에 있어서, I_{pr_av} 에 대한 IGBT 전류의 기여는 다음의 공식에 따라 결정될 수 있다:
- [0146] $I_{pr_av_igbt} = I_o \cdot t_{on} \cdot f$ eq. 4.5
- [0147] 양쪽 모두의 위상들 A 및 C에 있어서, I_{pr_av} 에 대한 다이오드 전류의 기여는 다음의 공식에 따라 결정될 수 있다:
- [0148] $I_{pr_av_diode} = I_{od} \cdot t_f \cdot f$ eq. 4.6
- [0149] 다이오드를 통과하는 평균 전류는 다음의 등식을 사용하여 결정될 수 있다.
- [0150] $I_{od} = (I_y + I_z)/2 = I_y/2$ eq.4.7
- [0151] 도 13c는 다이오드 전류에 대한 제 3 시나리오를 나타내며, 여기서 t_f 는 t_3 보다 크다. 도 13c에 나타낸 시나리오에서, $t_4 = t_3$ 이며 I_z 는 스위치 오프되는 전류인, $T/2$ 의 마지막에 존재하는 전류를 나타내는 논-제로 값이다. 양쪽 모두의 위상들 A 및 C에 있어서, I_{pr_av} 에 대한 IGBT의 기여는 상기 등식 4.5에 따라 결정될 수 있다. 도 13c에 나타낸 시나리오에서, 다이오드를 통과하는 평균 전류는 다음의 등식을 사용하여 결정될 수 있다:
- [0152] $I_{od} = (I_y + I_z)/2 \Rightarrow I_z = 2 \cdot I_{od} - I_y$, 여기서 $I_z > 0$ eq. 4.8
- [0153] 도 13c에 나타낸 시나리오에서, 양쪽 모두의 위상들 A 및 C에 있어서, I_{pr_av} 에 대한 다이오드 전류의 기여는 다음의 공식에 따라 결정될 수 있다:
- [0154] $I_{pr_av_diode} = I_{od} \cdot t_3 \cdot f = [I_y - b \cdot t_3/2] \cdot t_3 \cdot f$ eq. 4.9
- [0155] 전술한 3개의 시나리오들에 기초하여, t_f 가 t_3 이하인 경우에는 t_4 가 t_f 가 된다는 것이 인식될 수 있다. 또한, 위상 B IGBT들이 제로 전류에서 스위치 오프되는 경우에는, 스위치 오프 손실이 없게 되며 위상 A 또는 위상 C 다이오드들은 어떠한 에러 손실도 없게 된다.
- [0156] 상기 등식 4.1로부터, 소망하는 전류 I_{load_av} 가 알려진 경우에는, $I_{pr_average}$ 값이 계산될 수 있다는 것이 인식될 수 있다. $I_{pr_average}$ 의 절반은 하나의 위상(50% 온)으로부터 유래하게 된다. 그러므로,
- [0157] $I_{pr_av}/2 = I_k = I_{pr_av_igbt} + I_{pr_av_diode}$ eq. 4.10
- [0158] 또한, 전류 I_y 는 아래의 등식에 나타낸 바와 같이, I_o 의 함수로 표현될 수도 있다:
- [0159] $I_y = I_o + b \cdot (t_{on}/2)$ eq. 4.11
- [0160] $I_{pr_av_diode}$ 에 있어서, t_f 가 t_3 이하인 경우에는, 등식들 4.6 및 4.7은 다음을 따른다:
- [0161] $I_{pr_av_diode} = (I_y/2) \cdot t_f \cdot f$ eq. 4.12
- [0162] t_f 가 그보다 큰 경우에는, 등식 4.9가 다음을 따른다:
- [0163] $I_{pr_av_diode} = (I_y - b \cdot t_3/2) \cdot t_3 \cdot f$ eq. 4.13

[0164] I_y 가 I_o 의 함수이기 때문에, 정의 $I_y - b * t_f = 0$ 에 의해, 다음의 등식이 얻어질 수 있다:

$$[0165] \quad t_f = I_y / b = [I_o + (t_{on}/2)] / b$$

[0166] 상기 등식은 2개의 미지의 I_o 및 t_{on} 을 가지고 있으며, 이에 따라 상기 나타낸 형태로는 해가 구해질 수 없다. 그러나, t_{on} 이 충분히 크다는 것을 나타내는 $t_f \geq t_3$ 인 경우, I_x 의 레벨과 속도 b 의 조합에서, 절반 구간이 완료하기 이전에 다이오드를 통과하는 전류가 다이 오프되기에 충분한 t_3 시간($T/2 - t_{on}$)이 존재하지 않는다. 이것은 저-전압, 고-전류 동작 및 $t_4=t_3$ 의 경우에 명확하다. 한편, t_{on} 이 충분히 크지 않다는 것을 나타내는 $t_f < t_3$ 인 경우에는, I_x 의 레벨과 속도 b 의 조합에서, 절반 구간이 완료하기 이전에 다이오드를 통과하는 전류가 다이 오프되기에 충분한 t_3 시간($T/2 - t_{on}$)이 존재한다. 이것은 고-전압 동작 및 $t_4=t_f$ 의 경우에 명확하다.

[0167] $t_4=t_3$ ($t_f \geq t_3$ 인 경우)에서 $I_{pr_av_diode}$ 의 계산이 매우 정확하다는 것이 또한 인식될 것이다. $I_{pr_av_diode}$ (및 거기에서의 I_o)를 확인함에 있어서 2개의 미지값들의 문제를 해결하기 위해, $t_4=t_f$ ($t_f < t_3$ 의 경우) 동안, 값 I_{od} 는 경미하게 과도 추정될 수 있으며, 이것은 경미하게 과도 추정된 $I_{pr_av_diode}$ 를 야기하게 된다. $I_{od}=I_y - b*t_4/2$ 의 계산에서 $t_4 = \min(t_3, t_f)$ 을 사용함으로써, I_{od} 의 지속기간이 정확하다는 것을 보장할 수 있다. 따라서, 과도 추정만이 I_o (및 이에 따른 I_{od} 의 레벨) 추정에 존재한다. 대략 $t_4=t_3$ 에 의해, $t_f \geq t_3$ 일 경우 $I_{pr_av_diode}$ 의 계산이 매우 정확해지며, $t_f < t_3$ 일 경우에는 경미하게 과도 추정된다. 따라서, I_o 를 추정할 때에는 t_4+t_3 가 사용된다. 이것은 다음의 등식들을 따른다:

$$[0168] \quad t_f = t_3 = t_4 = T/2 - t_{on} = 1/(2*f) - t_{on} \quad \text{eq. 4.14}$$

$$[0169] \quad t_{on} = (V_{prim}/V_{dc}) * 0.5 / f_r \quad \text{eq. 4.15}$$

$$[0170] \quad V_{prim} = V_{load} * n \quad \text{eq. 4.16}$$

[0171] 예시적 실시예에서, $V_{load_batt} = 80V$, $T/2 = 1/1200$ 초($f_r=600Hz$)이며 V_{load_field} 는 다음의 등식에 따라 계산될 수 있다:

$$[0172] \quad V_{load_field} = 0.161 \text{ Ohms} * I_{field} \quad \text{eq. 4.16a}$$

[0173] 따라서, 부하에서 I_{field} 및 I_{batt} 의 레벨들을 아는 경우, V_{load_field} 를 탐색하기 위하여 등식 4.16a가 사용될 수 있거나 또는 $V_{load_batt}=80V$ 가 사용될 수도 있다. 등식 4.15를 통하여 이들 값들을 사용하는 경우, 배터리 및 필드 여기(field excitation) 케이스들 양쪽 모두에 대한 t_{on} 가 결정될 수 있다. $I_y = I_o + b*t_{on}/2$ 가 주어지는 경우, 또한 $I_y = I_{od} + b*t_4/2$ 는 다음을 따른다:

$$[0174] \quad I_{od} = I_o + (b/2) * (t_{on}-t_4) \quad \text{eq. 4.17}$$

[0175] 등식 4.14을 사용하면:

$$[0176] \quad I_{od} = I_o + (b/2) * [t_{on} - 1/(2*f) + t_{on}] \Rightarrow$$

$$[0177] \quad I_{od} = I_o - (b/2) * [(1/(2*f)) - 2*t_{on}] \quad \text{eq. 4.18}$$

[0178] 등식들 4.5, 4.9, 및 4.10로부터:

$$[0179] \quad 0.5 * I_{pr_av} = I_k = I_o * t_{on} * f + I_{od} * t_4 * f$$

[0180] 등식들 4.18 및 4.14로부터 t_f 를 대체하는 것은 다음을 따른다:

$$[0181] \quad 0.5 * I_{pr_av} = I_k =$$

$$[0182] \quad I_o * t_{on} * f + [I_o - (b/2)] * [(1/(2*f)) - 2*t_{on}] * [1/(2*f) - t_{on}] * f \quad \text{eq. 4.19}$$

[0183] 등식 4.3을 다시 참조하면, 다음을 알 수 있다:

$$[0184] \quad b = V_{dc} / [L_{leak} + L_{magn} || L_{load} * n^2]$$

[0185] 등식 4.1로부터:

$$[0186] \quad I_{pr_average} = (I_{load_av} / n) + I_{magn}$$

[0187] 따라서, 등식 4.19는 하나의 미지값 I_o 만을 갖는다. 상기 표현을 정리하면 I_o 에 대한 해는 다음을 따른다:

[0188]
$$I_k = f * \{ [I_o / (2 * f)] - (b / 2) \} * [(1 / (2 * f)) - 2 * t_{on}] * [(1 / (2 * f)) - t_{on}] \Rightarrow$$

[0189]
$$I_k = I_o / (2) - (b * f) * [(1 / (2 * f)) - 2 * t_{on}] * [(1 / (2 * f)) - t_{on}] \Rightarrow$$

[0190]
$$I_o = 2 * I_k + b * f * [(1 / (2 * f)) - 2 * t_{on}] * [(1 / (2 * f)) - t_{on}] \quad \text{eq. 4.20}$$

[0191] 배터리 충전 예

[0192] 등식 4.2는 배터리(808)(도 8)를 포함하는 배터리 충전 회로에 대한 정상 상태 명세 값들을 사용하여 I_x 및 I_y (도 13a 내지 도 13c)에 대한 값들을 결정하는데 사용될 수 있다. 배터리 충전 회로에 대한 예시적 값들이 아래의 표 27에 나타나 있다.

표 27

I _{batt} (A)	V _{dc} (V)	I _{prim} aver =I _{batt} /n +I _{mag} n	0.5 I _{prim} =I _k	a (A/s)=V _{dc} / L _{leak} Prim	b(A/s) = V _{dc} / L _b
300	1500	134.35	67.17	65971764	485255.8
300	1300	134.35	67.17	57175529	420555.0
300	875	134.35	67.17	38483529	283065.9
380	700	162.17	81.09	30786823	226452.7
380	400	162.17	81.09	17592470	129401.5
225	300	108.26	54.13	13194353	97051.16
225	250	108.26	54.13	10995294	80875.96

[0193]

[0194] 표 27에서, I_{batt} 는 평균 배터리 전류이며, V_{dc} 는 링크 전압(102)이다. 또한, 표 27에 나타난 계산들은 변압기(810)에 대한 80 볼트의 배터리전압 V_{load_batt}, 600 Hz의 주파수, 및 2.875의 변압기 권선비 n 을 사용한다. 이들 값들을 사용하여, a 및 b에 대한 값들이 표 27에 나타난 바와 같이 계산되었다. 표 27에 나타난 a 및 b에 대한 값들을 사용하면, 표 28에 나타난 값들이 결정될 수 있다.

표 28

$t_{on} = (V_{prim} / V_{dc}) * 0.5 * f$	$I_o = 2 * I_k + b * f * ((1 / (2 * f)) - 2 * t_{on}) * ((1 / (2 * f)) - t_{on})$	$I_y = I_o + b * t_{on} / 2$	$I_x = I_o - b * t_{on} / 2$	$t_3 = T / 2 - t_{on}$	$t_1 = I_y / b$	$\text{if } t_1 < t_3 \text{ then } t_4 = t_1 \text{ else } t_4 = t_3$	$I_{od} = I_y - b * t_4 / 2$	$(I_o * t_{on} + I_{od} * t_4) * f / 2 = 2 * I_k \text{ for half period}$	$t_4 + t_{on}$	$I_z = I_{od} - b * t_4 / 2$
1.278E-04	253.0	284.0	222.0	7.06E-04	5.85E-04	5.85E-04	142.0	138.6	0.0007131	0
1.474E-04	227.5	258.5	196.5	6.86E-04	6.15E-04	6.15E-04	129.3	135.6	0.0007622	0
2.190E-04	175.6	206.6	144.6	6.14E-04	7.30E-04	6.14E-04	119.6	134.3	0.0008333	32.70
2.738E-04	183.9	214.9	152.9	5.60E-04	9.49E-04	5.60E-04	151.5	162.2	0.0008333	88.19
4.792E-04	158.7	189.7	127.7	3.54E-04	1.47E-03	3.54E-04	166.8	162.2	0.0008333	143.91
6.389E-04	103.2	134.2	72.2	1.94E-04	1.38E-03	1.94E-04	124.8	108.3	0.0008333	115.36
7.667E-04	106.0	137.0	75.0	6.67E-05	1.69E-03	6.667E-05	134.3	108.3	0.0008333	131.61

[0195]

[0196] 표 28로부터의 값들을 기초하면, V_{link} 가 더 높아짐에 따라 t_{on} 가 더 작아지고, t₃ 가 더 커진다는 것이 인식된다. 또한, 더 높은 V_{link} 값들에 있어서, t₃>t_f 이고 t₄=t₃ 이 된다. 따라서, 이들 더 높은 V_{link} 레벨들에 있어서, 절반 구간이 만료되기 이전에 다이오드 전류가 다이 오프되기 때문에 I_z 는 0 이 된다. 더 높은 V_{link} 레벨들에 있어서 t₄ = t_f < t₃ 이기 때문에, t₄ + t_{on} < 절반 구간 = 0.0008333초가 된다. 또한, IGBT가 스위

치 오프되는, 피크 I_y 값들은 크다(284A @ 1500V). 상기 표들로부터 I_o , t_{on} , I_{od} , 및 t_4 의 정확도를 확인하기 위해, 이들 값들은 아래의 표 29에 나타난 바와 같은 평균 부하 전류(I_{sec_av})를 추정하는데 사용될 수 있다.

표 29

I_{batt} (A)	V_{dc} (V)	I_o	t_{on}	$I_{light\ aver} = I_o * t_{on} * f$	t_4	$I_{diode\ aver} = I_{do} * t_4 * f$	$I_{prim\ aver} = 2 * (sum\ light\ aver + I_{diode\ aver})$	$I_{sec\ aver} = (I_{prim\ aver} * 30) * n$
300	1500	253.0378	1.3E-04	19.400	5.8551E-04	49.878	158.5554	312.10
300	1300	227.54182	1.5E-04	20.129	6.1481E-04	47.684	155.6244	303.67
300	875	175.58301	2.2E-04	25.077	6.1431E-04	44.097	134.3478	300.00
380	700	183.89489	2.7E-04	30.211	5.5951E-04	50.876	162.1739	380.00
380	400	158.73668	4.8E-04	45.637	3.5421E-04	55.450	162.1739	380.00
225	300	103.22859	6.4E-04	39.571	1.9441E-04	14.559	108.2609	225.00
225	250	105.99634	7.7E-04	48.758	6.667E-05	3.372	108.2609	225.00

[0197]

[0198]

전술한 바와 같이, $t_3 > t_f = t_4$ (위의 $V_{link}=1300V$ 및 $1500V$ 케이스들) 일 때마다, I_{od} 가 경미하게 과대 추정될 수 있다. 이것은 위의 표 29에 나타난 $I_{batt}=I_{sec_av}$ 의 경미한 과대 추정을 야기한다. 다른 모든 케이스들(V_{link} 250V 내지 1300V 근처의 케이스들)에서는, 추정이 매우 정확하다.

[0199]

필드 여기(FIELD EXCITATION) 예

[0200]

등식 4.2는 계자 권선(802)(도 8)을 포함하는 필드 여기 회로에 대한 정상 상태 값들을 사용하여 I_x 및 I_y (도 13a 내지 도 13c)에 대한 값들을 결정하는데 사용될 수 있다. 배터리 충전 회로에 대한 예시적 값들이 아래의 표 30에 나타나 있다.

표 30

I_{field} (A)	$V_{field}(V) = 0.161 * I_{field}$	V_{dc} (V)	$V_{prim\ aver} = V_{load} * n$	$I_{igbt/diode\ aver} = .5 I_{prim} = I_k$	a (A/s) = $V_{dc} / L_{leak\ Prim}$	b (A/s) = V_{dc} / L_b
125	20.125	1500	127.46	24.87	51670685	58514.86
400	64.4	1300	407.87	46.58	44781261	50712.88
400	64.4	875	407.87	46.58	30141233	34133.67
325	52.325	700	331.39	40.66	24112987	27306.93
200	32.2	400	203.93	30.79	13778849	15603.96
175	28.175	300	178.44	28.82	10334137	11702.97
125	20.125	250	127.46	24.87	8611781	9752.48

[0201]

[0202]

표 30에서, I_{av_field} 는 계자 권선의 평균 전류이고, V_{dc} 는 링크 전압(102)이다. 또한, 표 30에 나타나 있는 계산들은 변압기(804)(도 8)에 대한 80 볼트의 배터리전압 V_{load_batt} , 600 Hz의 주파수, 및 6.33의 변압기 권선비 n 을 사용한다. 이들 값들을 사용하여, a 및 b 에 대한 값들이 표 30에 나타난 바와 같이 계산되었다. 표 30에 나타난 a 및 b 에 대한 값들을 사용하면, 표 31에 나타난 값들이 결정될 수 있다.

표 31

$I_2 = (V_{prim}/V_{dc}) * 0.5/f * ton$	$I_o = 2 * I_k * b * t^2 * (t_1/(2 * t_f) - 2 * ton)^2 * ((1/(2 * t_f)) - ton)$	$I_y = I_o * b * ton/2$	$I_x = I_o * b * ton/2$	$t_3 = T/2 * ton$	$t_f = I_y/b$	t_4 (if $t_f < t_3$, $t_4 = t_f$ if $t_f > t_3$, $t_4 = t_3$)	$I_{od} = I_y * b * t_4/2$	$(I_o * ton + I_{od} * t_f) * t^2 * 2 * I_k$ for half period	$t_4 * ton$	$I_z = I_{od} * b * t_4/2$
7.08E-05	68.25	70.33	66.2	7.6E-04	1.2E-03	7.6E-04	48.02	49.74	0.0008333	25.708
0.0002614	98.56	105.19	91.9	5.7E-04	2.1E-03	5.7E-04	90.69	93.16	0.0008333	76.188
0.0003884	93.67	100.30	87.0	4.4E-04	2.9E-03	4.4E-04	92.71	93.16	0.0008333	85.116
0.0003945	81.63	87.02	76.2	4.4E-04	3.2E-03	4.4E-04	81.03	81.32	0.0008333	75.938
0.0004248	61.32	64.83	58.2	4.1E-04	4.2E-03	4.1E-04	61.64	61.58	0.0008333	58.457
0.0004956	57.26	60.16	54.4	3.4E-04	5.1E-03	3.4E-04	58.18	57.63	0.0008333	56.206
0.0004248	49.70	51.77	47.6	4.1E-04	5.3E-03	4.1E-04	49.78	49.74	0.0008333	47.786

[0203]

[0204]

표 30 및 31로부터의 값들을 기초로 하면, I_b 가 크기 때문에 (25.63mH), 속도 b 가 V_{link} 가 모든 동작 범위에 대해 작다는 것이 인식될 것이다. 이것은 또한 (서로 근접해 있는) I_x , I_o , I_y 의 상대적 값들로부터 알 수 있다. b 가 작기 때문에, V_{link} 의 모든 동작 범위 동안 $t_f > t_3$ 이다. 따라서, t_4 는 소망하는 필드 전류가 너무 낮아서 ton 가 매우 짧아지게 되지 않는 한 항상 t_3 보다 크다. 상기 표들로부터의 I_o , ton , I_{od} , 및 t_4 의 정확도를 확인하기 위해, 이들 값들은 아래의 표 32에 나타난 바와 같은, 평균 부하 전류(I_{sec_av})를 추정하는데 사용될 수 있다.

표 32

I_{field} (A)	V_{dc} (V)	I_o	ton	$I_{light_aver} = I_o * ton * f$	t_4	$I_{diode_aver} = I_{do} * t_4 * f$	$I_{prim_aver} = 2 * (sum(I_{light_aver} + I_{diode_aver}))$	$I_{sec_aver} = (I_{prim_aver} - 30) * n$
125	1500	68.255	7E-05	2.900	7.6E-04	21.969	49.736842	125.00
400	1300	98.560	3E-04	15.461	5.7E-04	31.118	93.157895	400.00
400	875	93.672	4E-04	21.832	4.4E-04	24.747	93.157895	400.00
325	700	81.634	4E-04	19.324	4.4E-04	21.334	81.315789	325.00
200	400	61.516	4E-04	15.682	4.1E-04	15.108	61.578947	200.00
175	300	57.257	5E-04	17.028	3.4E-04	11.787	57.631579	175.00
125	250	49.698	4E-04	12.669	4.1E-04	12.200	49.736842	125.00

[0205]

[0206]

표 32에 나타난 바와 같이, t_f 는 항상 t_3 보다 크기 때문에, I_{od} 를 추정함에 있어서 에러가 없으며, 이에 따라, I_{av_field} 를 추정함에 있어서 에러가 없다. V_{batt} , $V_{dc}(=V_{link})$, $I_{batt}(=I_{av_batt})$ 및 $I_f(=I_{av_field})$ 에 대한 값들을 사용하고 또한 표 29 내지 32에 나타난 등식들을 사용하면, 컴퓨터 모델인 ton_batt , $I_{pr_av_batt}$, ton_f 및 $I_{pr_av_f}$ 에 대한 값들을 추정하도록 구성될 수 있다. ton_batt , $I_{pr_av_batt}$, ton_f 및 $I_{pr_av_f}$ 에 대한 추정된 값들은 H-브리지 제어기에 의해 알려진 정보를 나타내며, 따라서, 컴퓨터 모델은 비-실시간 추정들을 위해 사용될 수 있다. 구체적으로, ton_batt , $I_{pr_av_batt}$, ton_f 및 $I_{pr_av_f}$ 에 대한 추정 값들과 V_{dc} 는 위에서 도출된 등식들(및 표 28 내지 32의 반복)을 사용하여, 위상 전류 파라미터들 I_{x_B} , I_{ss_B} , I_{z_B} , I_{x_batt} , I_{y_batt} , I_{z_batt} , t_{4_batt} , $I_{d_batt}(I_{do})$, I_{ss_batt} , I_{x_f} , I_{y_f} , I_{z_f} , t_{4_f} , $I_{d_f}(I_{do})$, 및 I_{ss_f} 에 대한 값들을 추정하는데 사용될 수 있다. 그 후에, 상기 위상 전류 파라미터들은 IGBT들(104)에 대한 전력 손실 추정들을 결정하는데 사용될 수 있다.

[0207]

도 14는 위상 A 및 위상 C IGBT들과 다이오드들의 전력 손실을 추정하는데 사용되는 전류 및 전압 파형의 그래프이다. 스위치 온 시에, $E_{on}(I_x)$ 을 사용하여 I_x 로부터 IGBT 손실들이 계산되게 된다. 스위치 오프 시에, $E_{off}(I_y)$ 를 사용하여 I_y 로부터 IGBT 손실들이 계산되게 된다. 온(ON) 동안, I_{ss} 의 함수로서 파라미터들을 사용하여(여기서, $V_{ce}(I_{ss})$ 를 사용시 $I_{ss} = I_o$ (등식 4.20로부터)) IGBT 손실들이 계산되게 된다. 일 예로서 위상 A를 사용하는 경우, 온 구간 동안의 IGBT 전력 손실, IGBT P_{ss} 가 다음의 등식을 사용하여 탐색될 수 있다:

[0208]

$$IGBT\ P_{ss} \quad PoA = I_{ssA} * V_{ce}(I_{ssA})$$

[0209]

상기 등식에서, PoA 는 ton 동안의 전력 손실이고, PoA 는 그 구간의 나머지 동안 0이다. 따라서, 전체 구간

평균 전력은 다음과 같다:

$$[0210] \quad P_{ssA} = I_{ssA} * V_{ce}(I_{ssA}) * t_{onA} * fr \quad [\text{Watts}]$$

$$[0211] \quad \text{IGBT } P_{swA}: \text{energy/pulse} = [E_{on}(I_{x_A}) + E_{off}(I_{y_A})] \text{ 및 } fr = \text{pulses per sec} \Rightarrow$$

$$[0212] \quad P_{swA} = [E_{on}(I_{x_A}) + E_{off}(I_{y_A})] * fr \quad [\text{J/sec=Watts}]$$

[0213] 역 회복(Reverse Recovery)에서의 위상 A 및 위상 C 다이오드들에 대한 전력 손실은 $Err(I_z)$ 을 사용하여 I_z 로부터 계산될 수 있다. 온(ON) 동안, I_{do} 의 함수로서 파라미터들을 사용하여(여기서, $Err(I_{do})$ 를 사용하여 $I_{do} = \{(I_z + I_y)/2\}$) 다이오드 손실들이 계산될 수 있다. 일 예로서 위상 A를 사용하는 경우:

$$[0214] \quad \text{다이오드 } P_d = V_f A(I_{dA}) * I_{dA} * (t_{4_A}) * fr$$

$$[0215] \quad \text{다이오드 } P_{rrA} = ErrA(I_{zA}) * fr$$

[0216] 도 15는 위상 B(공통) IGBT들과 다이오드들에서 전력 손실을 추정하는데 사용되는 전류 및 전압 파형의 그래프이다. 스위치 온 시에, 다음을 사용하여 IGBT 손실들이 계산되게 된다:

$$[0217] \quad I_{x_B} = I_{x_f} + I_{x_batt}$$

[0218] 스위치 오프 시에는, 다음으로부터 IGBT 손실들이 계산되게 된다:

$$[0219] \quad I_{z_B} = I_{z_f} + I_{z_batt}$$

[0220] 온(ON)(정상 상태) 동안, 도 15에 나타난 블록들 5, 6, 7 및 8의 평균 값으로부터 손실들이 계산되게 된다. 2개의 변압기들(804 및 810)을 통하여 평균 전류들이 T/2 동안 위상 B를 통과한다는 점을 계산에 넣으면 다음과 같다:

$$[0221] \quad I_{ssB} = I_{pr_av_batt} + I_{pr_av_f}$$

[0222] 상기 등식을 사용하면, 위상 B IGBT들에 대한 스위치 오프 손실들 IGBT P_{off} 는 다음의 공식을 사용하여 계산될 수 있다:

$$[0223] \quad \text{IGBT } P_{off} = fr * E_{offB}(I_{z_B})$$

[0224] 위상 B IGBT들에 대한 스위치 오프 손실들 IGBT P_{on} 은 다음의 공식을 사용하여 계산될 수 있다:

$$[0225] \quad \text{IGBT } P_{on} = fr * E_{onB}(I_{x_B})$$

[0226] 위상 B IGBT들에 대한 정상 상태 손실들(온-상태) IGBT P_{ss} 는 다음의 공식을 사용하여 계산될 수 있다:

$$[0227] \quad \text{IGBT } P_{ss} = I_{ssB} * V_{ce}(I_{ssB}) * 0.5, \text{ 여기서 } (0.5 = (T/2)/T)$$

[0228] 또한, 위상 B에서, 각 IGBT(104)는 전체 절반 사이클 동안 온(ON)이다. 따라서, 위상 B의 다이오드들을 통과하는 전류는 없으며, 이에 따라, 위상 B에서의 다이오드들과 연관된 손실들이 없다.

[0229] 듀얼 H-브리지 최적화

[0230] 도 15 및 16과 관련하여 기술한 등식들 그리고 등식들 3.30 내지 3.34에서 기술된 히트싱크 파라미터들에 기초하면, 듀얼 H-브리지의 전체 열적 거동에 대한 컴퓨터 모델이 구성될 수 있다. 컴퓨터 모델은 듀얼 H-브리지의 열적 특성들을 분석함으로써, 듀얼 H-브리지의 전력-핸들링 능력이 논의되고 있는 견인 차량 또는 다른 전기 시스템에 의해 지시된 성능을 충족하는지의 여부를 결정하는데 사용될 수 있다. 듀얼 H-브리지에 대해 요구되는 예시적 성능 특성들이 아래의 표 33 및 34에 나타나 있다. 표 33은 최대 정상 상태 동작 조건들에 관하여 General Electric Company EVOLUTION® 기관차들에 대한 예시적 명세들을 나타낸다. 표 34는 최대 과도 조건들에 관하여 EVOLUTION 기관차들에 대한 예시적 명세들을 나타낸다.

표 33

EVOLUTION 기관차들에 대한 열적 정격(정상 상태)

열적 정격(정상 상태) 가이드라인							
VdcLink	250V	300V	400V	700V	875V	1300V	1500V
I _{field}	125A	175A	200A	325A	400A	400A	125A
I _{battery}	225A	225A	380A	380A	300A	300A	300A

[0231]

표 34

EVOLUTION 기관차들에 대한 최대 부하(전류 제한) 과도 조건들

최대 부하(전류 제한) 가이드라인							
VdcLink	250V	300V	400V	700V	875V	1300V	1500V
I _{field}	125A	175A	200A	450A	450A	450A	450A
I _{battery}	225A	380A	380A	380A	380A	380A	380A

[0232]

[0233]

듀얼 H-브리지의 전체 열적 거동에 대한 컴퓨터 모델은 임의의 명세들에 기초하여 IGBT들(104)의 접합 온도들 T_j 를 결정하는데 사용될 수 있다. 일 예로서, EVOLUTION 기관차들의 명세가 표 33 및 34에 나타나 있다. 이러한 특정 예에서, IGBT들(104)의 접합 온도 T_j 는 49 °C 주변(T_{air} = 49 °C + 일정한 5 °C로 예열 + 송풍기로 예열/플래뉴 7° C = 61° C)일 경우 130 °C까지 도달될 수 있는 것으로 고려될 수 있다. 이것은 디바이스의 긴 수명을 제한하지 않는 130 °C - 61 °C = 69 °C 의 최대 열적 사이클링을 가능하게 한다. 또한, 본 모델링에 있어서, H-브리지는 본 실시예들의 개선된 듀얼 H-브리지를 부-최적의 듀얼 H-브리지 구성과 비교하는 근거를 제공할 수 있다. 구체적으로, 듀얼 H-브리지는 위상 A가 배터리(808)에 전력을 공급하는데 사용되고, 위상 C가 계자 권선(802)에 전력을 공급하는데 사용되도록 구성될 수 있다. 입력으로서 표 33의 열적 정격 가이드라인들을 사용하면, 컴퓨터 모델은 부-최적의 듀얼 H-브리지 설계를 위해서, 표 35에 나타난 접합 온도들을 제공한다.

표 35

입력으로서 열적 정격(정상 상태) 가이드라인들을 사용

V _{batt} =80V	T _{air} =61degrC	field		batt								
V _{link}	SCFM	I _f	I _{batt}	P _B	P _C	P _A	I _{Bhs}	T _{Chs}	I _{Ahs}	T _{JB}	T _{JC}	T _{JA}
1500	198	125	300	637.15	462.24	903.00	98.73	92.83	114.37	112.86	102.54	133.84
1500	198	125	250	627.08	460.81	861.22	96.34	91.97	110.82	109.51	101.64	128.91
1500	198	400	300	820.39	590.94	781.31	107.16	98.54	107.52	124.58	110.75	123.93
875	198	400	300	720.09	428.15	593.91	100.93	89.08	96.20	116.03	98.07	108.68
700	198	325	380	739.62	330.30	626.64	101.30	85.15	97.21	116.83	92.09	110.37
400	113	200	380	589.39	195.03	485.37	104.40	91.48	102.16	116.77	95.56	112.33
300	85	175	225	384.86	156.99	278.68	95.70	88.17	89.98	103.78	91.47	95.83
250	71	125	225	350.55	129.49	254.55	95.96	88.63	89.92	103.52	91.34	95.26
		P _B C	P _B A									

[0234]

[0235]

표 35로부터, V_{link} = V_{dc} = 1500 에 있어서는, 듀얼 H-브리지에 대한 접합 온도 T_{JA} 가 바람직한 최대 온도 130°C를 초과한다는 것이 인식될 수 있다. 입력으로서 표 34의 전류 제한(과도적 최대 조건들)을 사용하여, 컴퓨터 모델은 표 36에 나타난 접합 온도들을 제공한다.

표 36

입력으로서 최대 부하(전류 제한) 과도 조건들을 사용

Vbatt=80V		Tair=61degC		600Hz								
Vlink	SCF M	If	Ibatt	PB	PC	PA	TBhs	TChs	TAhs	TJB	TJC	TJA
1500	198	450	380	1023.6	721.00	1041.5	118.48	107.39	122.31	139.98	122.53	144.38
1500	198	450	240	855.84	814.50	851.11	109.79	104.55	112.22	127.76	119.55	130.1
1500	198	125	260	636.06	461.09	874.13	96.8	92.14	111.52	110.16	101.82	129.88
1300	198	450	380	956.38	631.94	886.81	114.44	101.84	113.51	134.52	115.11	132.13
1300	198	125	380	703.98	404.03	884.93	99.94	90.15	111.66	114.72	98.63	130.25
1000	198	450	380	903.17	508.64	783.57	110.89	95.27	107.02	129.86	105.95	123.47
875	198	450	380	873.71	458.83	717.43	109.05	92.38	103.08	127.40	102.01	118.14
700	198	450	380	824.41	389.88	627.14	106.06	88.33	97.70	123.37	96.52	110.87
400	113	300	380	589.39	195.03	485.37	104.4	91.48	102.16	116.77	95.58	112.55
300	85	175	380	548.42	159.30	432.07	108.78	95.81	104.15	120.30	98.16	113.22
250	71	125	225	350.55	129.49	254.35	95.96	88.63	89.92	103.32	91.34	95.26
		Ph C	Ph A									

[0236]

[0237]

위의 데이터에 기초하여, 주변 공기 온도가 높은 경우, 1300V 이상인 Vlink 에 대한 접합 온도들 T_{JA} 및 T_{JB} 는 바람직한 접합 온도 한계 130 °C를 초과할 수 있다는 것을 알 수 있다. 접합 온도 가이드라인 130 °C를 초과한 것에 대한 응답으로, 듀얼 H-브리지 제어기는 도 23 및 24와 관련하여 아래에서 더 기술되는 바와 같이, 부하에 공급되는 전류를 저하시키도록 구성될 수 있다. 표 35 및 36으로부터의 데이터에 기초하여, 저하(derating)는 다음의 상황들, 즉 Vlink =1500V 및 If = 450A 인 경우에 일어날 수 있으며, 듀얼 H 브리지는 저하 없이 240A 배터리 전류까지 통과시킬 수 있다. Vlink =1500V 및 If = 125A 에서는, 듀얼 H 브리지가 저하 없이 260A 배터리 전류까지 통과시킬 수 있다. Vlink = 1300V 및 I_{battery}= 380A 에서는, 듀얼 H 브리지가 저하 없이 125A 필드 전류(field current)까지 통과시킬 수 있다. 또한, Vlink=1000V 는 주변 공기 온도에서 동작하면서 듀얼 H-브리지가 요구되는 성능 특성들을 충족할 수 있는 최대 전압이다. 표 35 및 36에 나타난 결과값들은 도 16을 참조하여 더 용이하게 이해될 수 있다.

[0238]

도 16은 냉각 유닛을 가진 듀얼 H-브리지의 블록도이다. 도 16에 도시된 바와 같이, 듀얼 H-브리지는 히트싱크(306)에 커플링된 듀얼 IGBT 모듈들(302)을 포함하며, 각 듀얼 IGBT 모듈(1600)은 위상 A(202), 위상 B(204), 또는 위상 C(206) 중의 하나에 대응한다. 냉각 유닛은 플레넘(1606)을 통해 듀얼 IGBT들(1600)로 냉각 공기의 흐름(1604)을 제공하는 하나 이상의 팬들(1602)를 포함한다. 표 35 및 36에 나타난 접합 온도 결과값들에 있어서, 위상 A 는 배터리 충전 회로에 전력을 제공하는 것으로 모델링되어 있고, 위상 B 는 여자기(field exciter)에 전력을 제공하는 것으로 모델링되어 있다.

[0239]

도 16에 도시된 바와 같이, 냉각 유닛은 또한 공기 흐름이 듀얼 IGBT 모듈들(1600) 쪽을 향하게 하도록 구성된 베인(vein; 1608)을 포함한다. 이 구성으로 인하여, 위상 C(206)은 최대한의 공기를 수신하게 되고 위상 A(202)는 최소한의 공기를 수신하게 된다. 이것은 위상 A의 전체 유효한 R_{th} 가 3개의 위상들 중에서 가장 크게 되고 또한 위상 C의 전체 유효한 R_{th} 가 3개의 위상들 중에서 가장 작아지게 되도록 한다. 또한, 표 35 및 36의 데이터에 기초할 경우, 배터리의 전력 손실(P_A)은 듀얼 H-브리지 설계가 접합 온도 가이드라인인 130 °C를 초과하는 경우들 중에서 가장 큰 것이라는 것을 알 수 있다. 따라서, 가장 큰 R_{th}를 가진 위상에 의해 가장 큰 전력 이 히트싱크에 인가된다. 실시예들에 따르면, 듀얼 H-브리지의 열적 능력은 가장 작은 R_{th}를 가진 위상(위상 C)이 사용되어 듀얼 H-브리지의 배터리 충전기 부분을 제어하고 또한 가장 큰 R_{th}를 가진 위상(위상 A)이 사용되어 필드 여기를 제어하는 경우에 개선될 수 있다. 즉, 듀얼 H-브리지의 열적 능력은 I_{batt} 및 I_{field} 를 제어하는 위상들을 변경하는 것에 의해 개선될 수 있다. 접합 온도들을 결정하기 위해 사용된 열적 모델은 이에 따라 변경될 수 있다. 개선된 듀얼 H-브리지 설계를 위하여 열적 모델에 대한 입력으로서 표 33의 열적 정격(정상 상태) 명세들을 사용하는 경우, 표 37에 나타난 접합 온도들이 계산될 수 있다.

표 37

교체 이후

교체 이후												
V _{batt} =80V		T _{air} =61degC				batt	field					
V _{link}	SCFM	I _f	I _{batt}	P _B	P _C	P _A	T _{Bhs}	T _{Chs}	T _{Ahs}	T _B	T _C	T _A
1500	198	125	300	667.91	920.63	462.36	101.95	109.49	92.91	116.18	128.82	102.62
1300	198	400	300	822.79	778.96	591.78	108.5	105.18	98.78	125.78	121.54	111.21
875	198	400	300	721.86	592.7	427.42	102.09	95.06	88.52	117.24	107.51	97.49
700	198	325	380	742.87	625.26	328.72	103.38	95.88	83.46	118.98	109.01	90.36
400	113	200	380	595.9	487.35	191.81	110.1	104.91	83.88	122.61	115.15	87.91
300	85	175	225	387.06	281.04	154.88	99.08	94.57	81.2	107.21	100.47	84.46
250	71	125	225	552.97	257.58	127.78	100.23	95.75	80.26	107.64	101.16	92.94
		Ph A	Ph C									

[0240]

[0241]

표 37에 나타난 바와 같이, 위상 C로 배터리충전기를 동작시키고 위상 A로 여자기(field exciter)를 동작시키는 것에 의해, 위상들 모두에 대한 접합 온도들이 130 °C 접합 온도 가이드라인 미만인 된다. 또한, 표 37로부터, 새로운 듀얼 H-브리지 설계에서는, T_JA 가 항상 T_JB 및 T_JC 미만이라는 것을 알 수 있다. 따라서, 듀얼 H-브리지에서 사용된 환기 및 열 보호 기술들은 위상 B 및 위상 C에 대해서만 기초할 수 있다.

[0242]

듀얼 H-브리지에서의 접합 온도들의 추정

[0243]

도 17은 실시간 히트싱크 온도 판독치들을 제공하도록 구성된 듀얼 H-브리지의 블록도이다. 도 17에 도시된 바와 같이, 듀얼 H-브리지(200)는 히트싱크(306)에 배치된 서미스터와 같은 온도 센서(1700)를 포함할 수 있다. 일 실시예에서, 단일의 온도 센서(1700)는 위상 B 및 위상 C 듀얼 IGBT들(302) 사이의 히트싱크에 배치될 수 있다. 온도 센서(1700)로부터의 온도 판독치들은 듀얼 H-브리지(200)의 시스템 제어기(1702)로 전송될 수 있다. 온도 센서 판독들에 기초하여, 시스템 제어기(1702)는 위상 A 및 위상 B 듀얼 IGBT들에 대한 접합 온도들을 계산할 수 있다. 이러한 방식으로, 시스템 제어기(1702)는 접합 온도들이 신뢰성 있는 동작을 위한 특정 온도 가이드라인들 이내에 존재하는지의 여부를 결정할 수 있다. 접합 온도들이 특정 온도 가이드라인들을 초과하는 경우, 시스템 제어기(1702)는 예컨대 듀얼 IGBT들로의 명령 신호들을 저하함으로써 감소된 출력 전류를 제공하도록 하는 것과 같은, IGBT들을 보호하는 스텝들을 취할 수 있다. 단일 서미스터의 온도 판독치들에 기초하여 각 위상에 대한 접합 온도들을 결정하는 기술들은 도 17을 참조하여 더욱 용이하게 이해될 수 있다.

[0244]

도 18은 작동 중인 듀얼 H-브리지의 열 흐름에 관한 흐름도이다. 도 18에 도시된 바와 같이, 점(1802)으로 나타난 온도 센서는 3개의 상이한 소스들 PA, PB 및 PCA에 의해 가열되며, 여기서 PA, PB, 및 PC는 각각 위상들 A, B, 및 C의 전체 전력이다. 서미스터(1802)에서의 온도(TS)와 냉각 공기의 온도(T_{air}) 간의 온도 차는 다음의 등식을 사용하여 결정될 수 있다:

[0245]

$$TS_{air} = dTS = dTS_B + dTS_C + dTS_A =$$

[0246]

$$PB*RS_{airB} + PC*RS_{airC} + PA*RS_{airA} \quad \text{eq. 5.1}$$

[0247]

상기 등식에서, TS_{air}는 서미스터(센서) 위치에서의 온도(TS)와 냉각 공기의 온도(T_{air}) 간의 온도 차를 나타내고, PB*RS_{airB}, PC*RS_{airC} 및 PA*RS_{airA}는 센서 온도(TS) 마이너스 T_{air}에 대한 위상 B, C, 및 A의 기여들이다. 등식 5.1로부터, TS_{air}의 값이 상이한 테스트 구성들에 대해 검토될 수 있다. PB = PC = PA = P_{ph}인 도 4a에 나타난 테스트 구성에서:

[0248]

$$TS_{air_inv} = P_{ph} * (RS_{airB} + RS_{airC} + RS_{airA}) \Rightarrow$$

[0249]

$$TS_{air_inv}/P_{ph} = RS_{airB} + RS_{airC} + RS_{airA}$$

[0250]

상기 등식에서, TS_{air_inv}는 도 4a의 구성을 가진 테스트에서 센서 위치(1802)에서의 온도 마이너스 T_{air}를 나타낸다. 상기 등식에 기초할 경우, 온도 센서 위치와 주변 공기(RS_{air_inv}) 사이의 전체 열저항은 다음의 등식으로부터 결정될 수 있다:

[0251]

$$RS_{air_inv} = RS_{airB} + RS_{airC} + RS_{airA} \quad \text{eq. 5.2}$$

[0252] $PC = PA = Pph$ 이고, $PB=0$ (위상 A 와 C만이 전력 공급)인, 도 4c에 나타낸 테스트 구성에서:

[0253] $TSair_AC = Pph \cdot (RSairC + RSairA) \Rightarrow$

[0254] $TSair_AC / Pph = RSairC + RSairA$

[0255] 상기 등식에서, $TSair_AC$ 는 도 4c의 구성(위상 A 와 C가 전력 공급)에서의 센서 위치(1802)의 온도 마이너스 $Tair$ 를 나타낸다. 상기 등식에 기초할 경우, 온도 센서 위치와 주변 공기($RSair_AC$) 사이의 전체 열저항은 다음의 등식으로부터 결정될 수 있다:

[0256] $RSair_AC = RSairC + RSairA$ eq. 5.3

[0257] $PC = PB = Pph$ 이며, $PA=0$ (위상들 B 와 C만이 전력 공급)인, 도 4b에 나타낸 테스트 구성에서:

[0258] $TSair_BC = Pph \cdot (RSairC + RSairB) \Rightarrow TSair_BC / Pph = RSairC + RSairB$

[0259] 상기 등식에서, $TSair_BC$ 는 도 4b의 구성(위상들 B 및 C에 전력 공급)을 가진 테스트에서 센서 위치(1802)의 온도 마이너스 $Tair$ 를 나타낸다. 상기 등식에 기초할 경우, 온도 센서 위치와 주변 공기($RSair_BC$) 사이의 전체 열저항은 다음의 등식으로부터 결정될 수 있다:

[0260] $RSair_BC = RSairC + RSairB$ eq. 5.4

[0261] 등식들 5.2 내지 5.4를 조합하는 경우, 등식 5.1에 대한 파라미터들이 결정될 수 있으며 이것이 아래에 나타나 있다.

[0262] $RSairB = RSair_inv - RSair_AC$ eq.5.5

[0263] $RSairA = RSair_inv - RSair_BC$ eq.5.6

[0264] $RSairC = RSair_BC - RSairB$ eq.5.7

[0265] $RSairC = RSair_AC - RSairA$ eq.5.8

[0266] 도 4a 내지 도 4c에 도시된 각각의 테스트 구성들에 있어서, 열 측정들은 온도 센서(1700)의 상단에 있는 서모커플들을 사용하여 행해질 수 있다. 온도 센서(1700)로부터 측정된 열 데이터를 사용할 경우, 주변 공기에 대한 센서 사이의 열저항들이 다음의 등식을 사용하여 각 테스트 구성에 대해 결정될 수 있다:

[0267] $RSair_config = (TS - Tair) / \text{본 구성에 대한 } Pphase$

[0268] 상기 등식에서, $RSair_config$ 은 특정 테스트 구성에 대한 온도 센서와 주변 공기 사이의 열저항이다. 각 테스트 구성에 대한 예시적 $RSair_config$ 값들이 아래의 표 39-41에 나타나 있다.

표 39

$RSair_inv$

$RSair_inv$				
SCFM	200	100	50	$RSair_inv$
200	0.033011569	0.032218474	0.026652874	0.0326150
150	0.041474515	0.040874333	0.042228344	0.0415257
100	0.057020609	0.056650175	0.05483086	0.0561672
60		0.087608562	0.086559569	0.0870841
35		0.130332261	0.134432142	0.1323822
0		not equalized	0.743645188	0.7436452

[0269]

표 40

RSair_BC (B 와 C에만 전력 공급)

RSair_BC	B,C powered only			
SCFM	200A	100A	50A	Rsair_BC
200	0.030392574	0.029387758	0.027528435	0.029102922
150	0.038050568	0.036970489	0.035380293	0.03680045
100	0.049850757	0.04898972	0.047155326	0.048665268
60		0.073300021	0.070869149	0.072084585
35		0.108184258	0.107245004	0.107714631
0			0.586357568	0.586357568

[0270]

표 41

RSair_CA (A 와 C에만 전력 공급)

RSair_CA	A,C powered			
RSair_hb_CA				
SCFM	200A	100A	50A	RSair_CA
200	0.024150006	0.023149978	0.019766947	0.022355644
150	0.030000751	0.028165746	0.027038393	0.02840163
100	0.039189	0.03797098	0.034115662	0.037092004
60		0.058636565	0.054883517	0.056760041
35		0.09096046	0.084651701	0.08780608
0			0.464896274	0.464896274

[0271]

[0272]

RSair 는 온도 센서(1700)와 냉각 공기 사이의 열저항을 나타내기 때문에, IGBT의 케이스와 히트싱크 사이의 열저항, 그리스(308)의 Rth_ch 는 상기 값들을 계산함에 있어서의 인자(factor)가 아니다. 따라서, 0.009 ° C/W 의 보정 인자는 상기 값들로부터 감소되지 않는다. 표 39-41로부터의 RSair 값들을 사용하여 등식들 5.5 내지 5.8을 적용할 경우, RSairB, RSairC, 및 RSairC1, 및 Rsair_A 에 대한 값들은 아래의 표 42에 나타난 바와 같이 얻어질 수 있다.

표 42

SCFM	RSair_B = RSair_inv - RSair_AC	RSair_A = RSair_inv - RSair_BC	RSair_C1 = RSair_BC - RSair_B	RSair_C = RSair_AC - RSair_A
200	0.0102594	0.0035121	0.0188435	0.0188435
150	0.0131241	0.0047253	0.0236763	0.0236763
100	0.0190752	0.0075019	0.0295901	0.0295901
60	0.0303240	0.0149995	0.0417606	0.0417606
35	0.0445761	0.0246676	0.0631385	0.0631385
0	0.2787489	0.1572876	0.3076087	0.3076087
			same result	

[0273]

[0274]

상기 방법 및 결과들을 확인하기 위하여, 각 위상에 대한 평균 전력이 테스트 데이터로부터 취해질 수 있으며, 이에 의해 TS-Tair(Est TS - Tair)를 추정할 수 있다. TS-Tair 추정값들은 아래의 표 43에 나타난 바와 같은, 온도 센서(1700)에 기초하는 TS-Tair(Test_TS - Tair)의 테스트 측정 값들과 비교될 수 있다.

표 43

INVERTER	(200A and 100A)			Test Data	test results	PX(min) of Pphase	RSairA*PA	RSairB*PB	RSairC*PC	SUM
SCFM	AV PA	AV PB	AV PC	Test_TS-Tair	RSair_inv	PA(min)*RSair_inv	est TS_A	est TS_B	est TS_C	Est TS-Tair
200	630.27	630.44	632.56	20.8	0.032615	20.55625605	2.2133708	6.467922	11.91967	20.60117
60	246.03	246.56	247.3	21.6	0.08708	21.42429240	3.6903222	7.476691	10.32738	21.49440
CA powered	(200A and 100A)									
SCFM	AV PA	AV PB	AV PC	Test_TS-Tair	RSair_CA	PX(min)*RSair_CA	est TS_A	est TS_B	est TS_C	Est TS-Tair
200	632.78	0	629.92	15.2	0.0223556	14.08226727	2.2223862	0	11.86993	14.09231
60	247.33	0	247.77	14.5	0.05676	14.06342520	3.7098215	0	10.34701	14.05684
BC powered	(200A and 100A)									
SCFM	AV PA	AV PB	AV PC	Test_TS-Tair	RSair_inv	PX(min)*RSair_inv	est TS_A	est TS_B	est TS_C	Est TS-Tair
200	0	631.25	632.59	19.2	0.0291029	18.41020351	0	6.476027	11.92024	18.39627
60	0	103.58	104.04	7.4	0.0720846	7.499681784	0	3.140962	4.344768	7.485731

[0275]

[0276]

도 3a 내지 도 3c에 나타난 3개의 테스트 구성들 이외에, 테스트 데이터는 또한 도 4d에 나타난 테스트 구성에 대해 수집되며, 여기서 위상 B를 통과하는 전류는 그것이 다른 2개의 위상들을 통과할 시에 50%-50% 로 나누어 진다. 표 42로부터의 RSair 값들, RSairB, RSairA, 및 RSairC1 이 아래의 표 44에 나타나 있다.

표 44

	RSairB =	RSairA =	RSairC1 =
SCFM	RSair_inv - RSair_AC	RSair_inv - RSair_BC	RSair_BC - RSairB
200	0.0102594	0.0035121	0.0188435
60	0.030324	0.014999	0.041761

[0277]

[0278]

RSairB, RSairA, 및 RSairC1에 대한 상기 값들을 사용하는 경우, TS-Tair(Est TS - Tair)에 대한 추정 값들이 계산되어서 도 4d의 테스트 구성에 대한 센서(1700)로부터 수집된 온도 데이터에 기초하여 TS-Tair(Test_TS - Tair)에 대한 측정 값들과 비교될 수 있다. 예시적 결과들이 아래의 표 45에 나타나 있다.

표 45

100-50-50	(200A and 100A)			Test Data	test results	PX(min) of Pphase	RSairA*PA	RSairB*PB	RSairC*PC	SUM
SCFM	AV PA	AV PB	AV PC	Test_TS-Tair	RSair_inv	PA(min)*RSair_inv	est TS_A	est TS_B	est TS_C	Est TS-Tair
200	243.230	627.97	248.946	12.5	NA	NA	0.854246	6.4425404	4.691022	11.99
60	245.483	648.63	250.502	34.5	NA	NA	3.682124	19.669618	10.46110	33.81

[0279]

[0280]

표 43 및 45에 나타난 데이터에 기초하는 경우, 본 명세서에 기술된 방법이 델타 센서 온도(TS - Tair)의 정확한 예측을 제공한다는 것이 인식될 것이다. 따라서, RSairB, RSairA, 및 RSairC에 대한 도출 값들은 아래에서 더 기술되는, 온도 센서 판독에 기초하여 IGBT들의 접합 온도들을 결정하는데 사용될 수 있다. 일 실시예에서는, 규격 상한(Upper Specification Limit; USL)들이 열저항 값들 RSairB, RSairA, 및 RSairC에 대해 도출될 수 있다. 등식들 5.5, 5.6, 및 5.7로부터, RSairB, RSairC 및 RSairA에 대한 USL들은 RSair_inv, RSair_AC 및 RSair_BC의 USL들에 따라 결정되게 된다. RSair_inv, RSair_AC 및 RSair_BC에 대한 USL 값들을

결정하기 위해, RSair_inv, RSair_AC 및 RSair_BC 의 값들이 6개의 추가적인 듀얼 H-브리지 디바이스들을 사용하여, 전술한 바와 같이 계산되었다. 이들 테스트들로부터 수집된 데이터가 아래의 표 47, 49, 및 51에 나타나 있다.

표 47

RSair_inv

SCFM		200	100	50	Rsair_inv
200	S1	0.033011569	0.032218474	0.026652874	0.03261502
150	S2	0.036732436	0.036769253	0.034668714	0.03605680
100	S3	0.034199689	0.032248306	0.029707583	0.03205186
60	S4	0.036543014	0.036066996	0.03397417	0.03552806
35	S5	0.035988094	0.036365532	0.03455658	0.03563674
0	S6	0.037171053	0.036365532	0.036180573	0.03657239

[0281]

표 49

RSair_BC

RSair_BC					
SCFM		200	100	50	Rsair_BC
200	S1	0.030392574	0.029387758	0.027528435	0.02910292
150	S2	0.030892073	0.029163511	0.024774019	0.02827653
100	S3	0.031175347	0.030122238	0.025411277	0.02890295
60	S4	0.030627623	0.02958748	0.023763399	0.02799283
35	S5	0.032299222	0.031504322	0.028070774	0.03062477
0	S6	0.031042792	0.02982247	0.026687318	0.02918419

[0282]

표 51

RSair_CA

RSair_CA					
SCFM		200	100	50	Rsair_CA
200	S1	0.024150006	0.023149978	0.019766947	0.022356
150	S2	0.022408928	0.021706019	0.017528	0.020548
100	S3	0.022526434	0.021490945	0.019240927	0.021086
60	S4	0.022393	0.021638007	0.017024725	0.020352
35	S5	0.022958567	0.022227875	0.021483666	0.022223

[0283]

[0284]

표 47, 49, 및 51에서, 라벨들 S1, S2, S3, S4, S5, 및 S6은 테스트에 사용된 상이한 듀얼 H-브리지들에 대해 수집된 데이터를 나타낸다. 이들 상이한 듀얼 H-브리지들 사이의 파라미터들의 파트-투-파트 편차는 통계 분석을 사용하여 기술될 수 있다. 예를 들어, 표 47, 49, 및 51에 나타난 데이터는 Minitab® 과 같은 통계적 모델링 패키지에 입력됨으로써 200 SCFM의 공기 흐름률에서의 RSair_inv, RSair_AC 및 RSair_BC 의 평균(μ)과 표준 편차(σ)를 얻을 수 있다. 이들 파라미터들에 대한 통계 데이터가 아래의 표 52에 나타나 있다.

표 52

Variable	N	Mean	Median	TrMean	StDev	SE Mean
RSair_inv	6	0.03474	0.03558	0.03474	0.00191	0.00078
RSair_AC	6	0.02901	0.02900	0.02901	0.00092	0.00038
RSair_BC	6	0.02127	0.02108	0.02127	0.00084	0.00034

[0285]

[0286] 표 22 및 23과 관련하여 위에서 나타난 통계적 프로세스를 사용하는 경우, 200 SCFM에서의 각 RSair_config에 대한 평균 및 표준 편차가 다음의 등식을 사용하여 대응하는 USL들을 계산하는데 사용될 수 있다:

[0287]
$$Z = (USL - \mu) / \sigma$$

[0288] $Z = 3$ 을 사용하는 경우 USL에 대한 해는 다음을 제공한다:

[0289]
$$USL = \sigma * 3 + \mu$$

[0290] RSair_inv의 USL에 대한 예시적 계산이 아래의 표 53 및 54에 나타나 있다.

표 53

6개 샘플로부터의 통계 결과		$Z * \sigma + \mu_0$	$\mu_0 /$ RSair_inv200 SCFM	USL/RSair_inv200 SCFM	$\sigma_0 /$ RSair_inv 200SCFM
μ_0	σ_0	USL for Z=3	K1	K2	K3
0.03474	0.00191	0.04047	1.065153367	1.240839285	0.058561973

[0291]

표 54

		RSair_inv*K1	RSair_inv*K2	RSair_inv*K3	$(USL - \mu) / \sigma$
SCFM	RSair_inv	μ	USL RSair_inv	σ	Z
200	0.032615	0.03474	0.040470	0.0019100	3
150	0.041526	0.04423	0.051527	0.0024318	3
100	0.056167	0.05983	0.069694	0.0032893	3
60	0.087084	0.09276	0.108057	0.0050998	3
35	0.132382	0.14101	0.164265	0.0077526	3
0	0.743645	0.79210	0.922744	0.0435493	3

[0292]

[0293] RSair_AC 와 RSair_BC 에 대해 동일한 절차를 사용하여, 아래의 표 55에 나타난 결과값들이 얻어졌다.

표 55

SCFM	USL RSair_inv	USL RSair_AC	USL RSair_BC
200	0.040470	0.0237900	0.0292860
150	0.051527	0.0302239	0.0370320
100	0.069694	0.0394719	0.0489714
60	0.108057	0.0604018	0.0725380
35	0.164265	0.0934398	0.1083922
0	0.922744	0.4947244	0.5900462

[0294]

[0295] RSairB, RSairC, RSairA에 대한 USL들은 등식들 5.5-5.7을 사용하고 표 55에 나타난 RSair_inv, RSair_AC, 및

RSair_BC 에 기초하여 계산될 수 있다. 등식 5.5로부터, RSairB에 대한 USL이 아래의 표 56에 나타낸 바와 같이 결정될 수 있다.

표 56

$$RSairB = RSair_inv - RSair_AC$$

SCFM	USL RSair_inv	USL RSair_AC	USL RSairB
200	0.040470	0.0237900	0.016680
150	0.051527	0.0302239	0.021303
100	0.069694	0.0394719	0.030223
60	0.108057	0.0604018	0.047656
35	0.164265	0.0934398	0.070825
0	0.922744	0.4947244	0.428020

[0296]

[0297]

등식 5.7로부터, RSairB 에 대한 USL 이 아래의 표 57에 나타낸 바와 같이 결정될 수 있다.

표 57

$$RSairC - RSairB$$

SCFM	USL RSair_BC	USL RSairB	USL RSairC
200	0.0292860	0.016680	0.012606
150	0.0370320	0.021303	0.015729
100	0.0489714	0.030223	0.018749
60	0.0725380	0.047656	0.024883
35	0.1083922	0.070825	0.037567
0	0.5900462	0.428020	0.162026

[0298]

[0299]

등식 5.6으로부터, RSairA에 대한 USL은 아래의 표 58에 나타낸 바와 같이 결정될 수 있다.

표 58

RSair_inv-RSairBC

SCFM	USL RSair_inv	USL RSair_BC	USL RSairA
200	0.040470	0.0292860	0.011184
150	0.051527	0.0370320	0.014495
100	0.069694	0.0489714	0.020723
60	0.108057	0.0725380	0.035519
35	0.164265	0.1083922	0.055873
0	0.922744	0.5900462	0.332698

[0300]

[0301]

표 56-58에 나타난 데이터에 대해 회귀 기술들을 적용하는 경우, RSairA, RSairB, 및 RSairC를 공기 흐름률의 함수로서 기술하는 회귀 등식들이 얻어질 수 있다. 표 56에 나타난 데이터에 대해 곡선 일치(curve fitting) 기술들을 적용하는 것은 다음을 따른다:

[0302]

$$RSairB = 0.0115 + 0.3845 \cdot \exp(-SCFM/13.23) +$$

[0303]

$$0.066 \cdot \exp(-SCFM/78.6) \quad \text{eq. 5.9}$$

[0304]

표 57에 나타난 데이터에 대해 곡선 일치 기술들을 적용하는 것은 다음을 따른다:

[0305]

$$RSairC = 6.47E-3 + 0.1406 \cdot \exp(-SCFM/16.23) +$$

[0306]

$$0.0257 \cdot \exp(-SCFM/139.8) \quad \text{eq. 5.10}$$

[0307]

표 58에 나타난 데이터에 대해 곡선 일치 기술들을 적용하는 것은 다음을 따른다:

[0308]

$$RSairA = 7.14E-3 + 0.301 \cdot \exp(-SCFM/13.93) +$$

[0309]

$$0.044 \cdot \exp(-SCFM/83.67) \quad \text{eq. 5.11}$$

[0310]

일 실시예에서, 온도 센서 위치 TS(1802)와 냉각 공기의 온도(Tair) 사이의 열용량들이 결정될 수 있으며, 여기서 CSair_A, CSair_B, 및 CSair_C 로 지칭된다. 먼저, 표 58에 나타난 150 SCFM에 대한 평균 테스트 데이터로부터:

표 59

열용량들(CSair_B, CSair_C, CSair_A)

SCFM	RSair_inv test	RSair_AC test	RSair_BC test	RSair_B = RSair_inv - RSair_AC	RSair_A = RSair_inv - RSair_BC	RSair_C1 = RSair_BC - RSair_B	RSair_C = RSair_AC - RSair_A
150	0.0415257	0.02840163	0.03680045	0.0131241	0.0047253	0.0236763	0.0236763

[0311]

[0312]

도 4c의 테스트 구성(위상 A 및 C에 전력 공급)에 있어서:

[0313]

$$Po \cdot ZSair_{CA} = Po \cdot [RSairC] / (1/CCs) + RSairA / (1/CCs)$$

[0314] 및 $Z_{sair_CA} = R_{sair_CA} / (1/CCAs)$ 인 경우:

$$\frac{R_{sair_CA}}{R_{sair_CA} \cdot C_{sair_CA} \cdot S + 1} = \frac{R_{sair_C}}{R_{sair_C} \cdot C_{sair_C} \cdot S + 1} + \frac{R_{sair_A}}{R_{sair_A} \cdot C_{sair_A} \cdot S + 1}$$

[0316] 시간 상수들 $R_{sair_C} \cdot C_{sair_C} = R_{sair_A} \cdot C_{sair_A}$ 이 τ_0 인 경우에는:

$$\frac{R_{sair_CA}}{R_{sair_CA} \cdot C_{sair_CA} \cdot S + 1} = \frac{R_{sair_C} + R_{sair_A}}{\tau_0 \cdot S + 1}$$

[0318] 상기로부터, $R_{sair_C} + R_{sair_A} = 0.0236763 + 0.0047235 = 0.02839998 = R_{sair_CA}$ 이기 때문에, 시간 상수 τ_0 가 R_{sair_CA} , R_{sair_C} , 및 R_{sair_A} 에 대해 동일하다는 것이 확인될 수 있다. 마찬가지로, 도 4b의 테스트 구성(위상 B 및 C에 전력 공급)에 있어서는, $R_{sair_C} + R_{sair_B} = 0.0236763 + 0.0131241 = 0.0368004 = R_{sair_BC}$ 이다. 따라서, τ_0 는 R_{sair_BC} , R_{sair_C} , 및 R_{sair_B} 에 대해 동일하다. 마찬가지로, 도 4a에 나타난 테스트 구성에 있어서, $R_{sair_C} + R_{sair_B} + R_{sair_A} = 0.0236763 + 0.0131241 + 0.0047235 = 0.0415239 = R_{sair_inv}$ 이다. 따라서, τ_0 는 동일한 공기 흐름에 관한 R_{sair_inv} , R_{sair_C} , R_{sair_B} , 및 R_{sair_A} 에 대해 동일하다는 것을 알 수 있다.

[0319] τ_0 가 R_{sair_inv} , R_{sair_C} , R_{sair_B} , 및 R_{sair_A} 에 대해 동일하다는 가정을 테스트하기 위해, 전력이 공급된 C와 A, 전력이 공급된 B와 C, 전력이 공급된 C와 A(인버터)에 대한 열용량들이, 도 14a 내지 도 14c에 나타난 각각의 테스트 구성들에 대한 테스트 데이터를 수집하는 것에 의해 결정될 수 있다. 각각의 테스트 구성들에 대한 테스트 데이터로부터, 냉각 곡선은 TS_{XX} 마이너스 T_{in1} 의 200A, 150 SCFM에 관해 표시될 수 있으며, 여기서 TS_{XX} 는 특정 테스트 구성 "XX"에 대한 센서의 온도이고, T_{in1} 은 냉각 유입 공기의 온도이다. 냉각 곡선으로부터, 다음의 열적 시간 상수들이 얻어질 수 있다:

$$\tau_{inv} = 196 \text{ sec}$$

$$\tau_{BC} = 190 \text{ sec}$$

$$\tau_{CA} = 186 \text{ sec}$$

[0323] $TS_{XX} - T_{in1}$ 값은 다음의 등식을 사용하여 추정될 수 있다:

$$TS_{XX} - T_{in1} = (\text{개시 온도} - \text{종료 온도}) \cdot \exp(-t/\tau) +$$

$$\text{종료 온도}$$

[0326] 그 후에, $TS_{XX} - T_{in1}$ 에 대한 추정 값은 도 19a 내지 도 19c에 나타난 바와 같이, 테스트 데이터와 비교될 수 있다.

[0327] 도 19a 내지 도 19c는 각종 테스트 구성들에 대한 시간에 따른, 추정된 $TS_{XX} - T_{in1}$ 과 실제 측정된 $TS_{XX} - T_{in1}$ 의 그래프들이다. 도 19a는 도 4b의 테스트 구성(위상들 A와 B에 전력 공급)에 대한 추정 값과 측정 값을 나타낸다. 도 19b는 도 4b의 테스트 구성(위상들 C와 A에 전력 공급)에 대한 추정 값과 측정 값을 나타낸다. 도 19c는 도 4a의 테스트 구성(위상들 A, B, 및 C에 전력 공급)에 대한 추정 값과 측정 값을 나타낸다. 도 19 내지 도 19c의 그래프들로부터, $TS_{XX} - T_{in1}$ 에 대한 추정 값들은 실제 측정된 값들에 매우 근접한 근사치라는 것이 인식될 수 있다.

[0328] 위에서 나타난 열적 시간 상수들 (196 sec, 190 sec, 186 sec)의 평균을 사용함으로써 다음이 제공된다:

$$\tau_{inv} = \tau_{BC} = \tau_{CA} = \tau_A = \tau_B = \tau_C = 190 \text{ sec}$$

[0330] 또한, $\tau = R_{th} \cdot C_{th}$ 를 계산에 넣으면, 열용량들은 표 59로부터 150 SCFM에 대한 평균 테스트 데이터를 사용하여 다음과 같이 계산될 수 있다:

$$C_{sair_B} = 190/0.0131241 \Rightarrow C_{sair_B} = 14,477 \text{ J/}^\circ\text{C eq. 5.12}$$

[0332] $CSair_A = 190/0.0047253 \Rightarrow CSair_A = 40,209 \text{ J/}^\circ\text{C}$ eq. 5.13

[0333] $CSair_C = 190/0.0236763 \Rightarrow CSair_C = 8,025 \text{ J/}^\circ\text{C}$ eq. 5.14

[0334] 상기 데이터에 기초할 경우, 서미스터가 위상들 B와 C 사이에 놓여 있기 때문에, 센서의 온도 변화에 대한 위상 A의 열용량의 영향이 위상들 B와 C로부터의 열용량의 영향보다 훨씬 약하다는 것이 인식될 것이다.

[0335] 위에서 도출된 열저항들 및 열용량들은 ZSairA, ZSairB, 및 ZSairC에 대한 열 임피던스들을 결정하는데 사용될 수 있다. 일 실시예에서, 열 임피던스들은 온도 센서로부터의 관독에 기초하여 IGBT들(104)의 접합 온도들을 결정하는 컴퓨터 모델을 생성하는데 사용될 수 있다.

[0336] 접합 온도들을 결정하기 위하여, 온도 센서(1700)와 각 위상의 케이스 사이의 온도 차가 결정될 수 있다. 위에서 논의된 바와 같이, TA = 위상 A에서 디바이스의 아래에 있는 뜨거운 지점의 히트싱크 온도이고, TB = 위상 B에서 디바이스의 아래에 있는 뜨거운 지점의 히트싱크 온도이며, TC = 위상 C에서 디바이스의 아래에 있는 뜨거운 지점의 히트싱크 온도이다. TA, TB, 및 TC는 RCA = RAC = 0 을 사용하여 등식들 3.1, 3.2, 및 3.3에 따라 결정될 수 있다.

[0337] 이에 따라:

[0338] $TA = PA*RA + PC*RAC + Tair$

[0339] $TB = PB*RB + PC*RBC + Tair$

[0340] $TC = PC*RC + PB*RBC + PA*RCA + Tair$

[0341] 상기 등식들에서, PA, PB, PC는 각각 위상 A, B, C에서 IGBT들 및 다이오드들 양쪽 모두를 통한 전력 손실이다. 또한, 열저항 파라미터들 RA, RB, RC, RCA, 및 RCB는 등식들 3.30 내지 3.34를 사용하여, 공기 흐름물에 기초하여 결정될 수 있다. 이들 파라미터들에 대한 USL들의 요약이 표 24에 나타나 있다.

[0342] TA, TB, 및 TC에 대한 등식들은 Tsensor를 사용하여 도출될 수 있다. Tsensor를 사용하여 도출된 TA, TB, 및 TC에 대한 값들은 여기서 각각 TAS, TBS 및 TCS로 지칭된다. 여기서 제공된 설명에 기초할 경우, 다음이 알려진다:

[0343] $TB = TSair + Tair + TBS = PB*RB + PC*RBC + Tair$

[0344] $TSair = RSairA*PA + RSairB * PB + RSairC * PC$

[0345] 이들 등식들을 조합하면 다음이 산출된다:

[0346] $TBS = (RB - RSairB)*PB + (RBC - RSairC)*PC - RSairA*PA$

[0347] 위상 B에 대한 PB의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0348] $RB - RSairB = RB_BS$ eq. 5.15

[0349] 위상 C로부터 위상 B에 대한 PC의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0350] $RBC - RSairC = RC_BCS$ eq. 5.16

[0351] 따라서, TBS에 대한 등식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0352] $TBS = RB_BS*PB + RC_BCS*PC - RSairA*PA$ eq. 5.17

[0353] 마찬가지로, TCS에 관해서는, 여기서 제공된 설명에 기초하여 다음과 같이 알려지게 된다:

[0354] $TC = TSair + Tair + TCS = PC*RC + PB*RCB + PA*RCA + Tair$

[0355] 따라서, TCS는 다음이 된다:

[0356] $TCS = (RCB - RSairB)*PB + (RC - RSairC)*PC + (RCA - RSairA)*PA$ 그리고 만약

[0357] 위상 B로부터 위상 C에 대한 PB의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0358] $(RCB - RSairB) = RB_CBS$ eq. 5.18

[0359] 위상 C에 대한 PC의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0360] $(RC-RSairC) = RC_CS$ eq. 5.19

[0361] 위상 A로부터 위상 C에 대한 PA의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0362] $(RCA-RSairA) = RA_CAS$ eq. 5.20

[0363] 따라서, TBS에 대한 등식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0364] $TCS = RB_CBS * PB + RC_CS*PC + RA_CAS*PA$ eq. 5.21

[0365] 마찬가지로, TAS에 관해서는, 여기에서 제공된 설명에 기초하여 다음과 같이 알려지게 된다:

[0366] $TA = TSair + Tair + TAS == PA*RA + PC*RAC + Tair$

[0367] $TSair = RSairA*PA+RSairB*PB+RSairC*PC$

[0368] 이들 등식들을 조합하면 다음이 산출된다:

[0369] $TAS = (RA-RSairA)*PB + (RBC-RSairC)*PC - RSairB*PB$

[0370] 위상 A에 대한 PA의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0371] $(RA-RSairA) = RA_AS$ eq. 5.22

[0372] 위상 C로부터 위상 A에 대한 PC의 기여는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0373] $(RBC-RSairC) = RA_ACS$ eq. 5.23

[0374] 따라서, TAS에 대한 등식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0375] $TAS = RA_AS*PA + RA_ACS*PC - RSairB*PB$ eq. 5.24

[0376] 위에서 나타난 등식들 5.17, 5.21, 및 5.24를 검증하기 위해, 아래의 표 62 및 63에 나타난 바와 같이, RCA, RCB, RC, RB, RA, RSairB, RSairA, 및 RSairC에 대한 테스트 값들이 사용되어 RB_BS, RC_BCS, RC_CS, RB_CBS, RA_CAS, RA_AS, 및 RA_ACS에 대한 값들을 얻을 수 있다.

표 62

원시 데이터(USL들이 아님)로부터

원시 데이터(USL들이 아님)로부터								
SCFM	$RSairB = RSair_inv - RSair_AC$	$RSairA = RSair_inv - RSair_BC - RSairB$	$RSairC = RSair_BC - RSairB$	RCA	RCB	RC	RB	RA
200	0.0102594	0.0035121	0.0188435	0.006491	0.003035	0.038707	0.047219	0.050155
60	0.030324	0.014999	0.041761	0.019869	0.015395	0.070647	0.088079	0.100536

[0377]

표 63

원시 데이터(USL들이 아님)로부터의 신규 파라미터들

원시 데이터(USL들이 아님)로부터의 신규 파라미터들							
SCFM	RB_BS	RC_BCS	RC_CS	RB_CBS	RA_CAS	RA_AS	RA_ACS
200	0.0369596	-0.0158085	0.019863	-0.007224	0.002979	0.04664	-0.01581
60	0.0577550	-0.0263656	0.028886	-0.014929	0.004870	0.08554	-0.02637

[0378]

[0379] 등식들 5.17, 5.21, 및 5.24에 기초할 경우, 아래의 표 64-69에 나타난 바와 같이, TAS, TBS, 및 TCS에 대한 추정 값들이 얻어지게 되어 측정 테스트 결과들과 비교될 수 있다. 구체적으로, 표 64 및 65는 도 4b에 나타난 테스트 구성(위상들 B와 C에 동일 전류로 전력 공급)에 대한 추정 값과 측정 값을 나타낸다. 표 66 및 67은 도 4a에 나타난 테스트 구성(모든 위상들에 동일 전류로 전력 공급)에 대한 추정 값과 측정 값을 나타낸다. 표 68

및 69는 도 4d에 나타난 테스트 구성(위상 B에 전체 전류, 위상들 A와 C에 절반 전류)에 대한 추정 값과 측정 값을 나타낸다.

표 64

BC에만 전력 공급

BC에만 전력 공급					
SCFM/A	AV PA	AV PB	AV PC	test TS-Tair	Est TS-Tair
200/200	0	631.23	632.59	19.2	18.40
60/100	0	245.37	246.26	18	17.72

[0380]

표 65

SCFM	AV PA	test TS-Tair	Est TS-Tair	est Txs	G+0.00 9*PX	TEST dTxs	Tair	ESTIM TX	TEST TX
200									
60									
SCFM	AV PB			est TBS=RB_BS*PB + RC_BCS*PC - RSairA*PA					
200	631.23	19.2	18.40	13.32969521	19.01	18.2	30.8	68.21	68.2
60	245.37	18	17.72	7.677500757	9.89	9.6	30.2	57.81	57.9
SCFM	AV PC			est FCS= RB_CBS * PB + RC_CS*PC + RA_CAS*PA					
200	632.59	19.2	18.40	8.005179368	13.70	12.9	30.8	62.89	62.9
60	246.3	18	17.72	3.451595277	5.67	5.4	30.2	53.59	53.7

[0381]

표 66

A, B, C에 동일 전류로 전력 공급

A, B, C에 동일 전류로 전력 공급					
SCFM	AV PA	AV PB	AV PC	Test_TS-Tair	Est TS-Tair
200	630.35	630.42	632.55	20.8	20.60
60	246	246.52	247.29	21.6	21.49

[0382]

표 67

SCF M	AV PA	test_T S-Tair	Est TS- Tair	est TAS=RA_AS*PA+ RA_ACS*PC- RSairB*PB	G+0.009*P X	TEST dTAS	Tair	ESTIM TA (case)	TEST TA(case)
200	630.35	20.8	20.60	12.93394	18.61	19.6	29.9	69.11	70.3
60	246	21.6	21.49	7.04657	9.26	9.6	30.7	61.45	61.9
SCF M	AV PB	test_T S-Tair	Est TS- Tair	est TBS=RB_BS*PB + RC_BCS*PC - RSairA*PA	G+0.009*P X	test dTBS	Tair	ESTIM TB(case)	TEST TB(case)
200	630.42	20.8	20.60	11.08653844	16.76	15.4	29.9	67.26	66.3
60	246.52	21.6	21.49	4.027944833	6.25	6.9	30.7	58.44	59.3
SCF M	AV PC	test_T S-Tair	Est TS- Tair	estTCS= RB_CBS * PB + RC _CS*PC + RA_CAS*PA	G+0.009*P X	test dTCS	Tair	ESTIM TC(case)	TEST TC(case)
200	632.55	20.8	20.60	9.887986614	15.58	15.4	29.9	66.08	66.1
60	247.29	21.6	21.49	4.660926233	6.89	6.9	30.7	59.08	59.1

[0383]

표 68

100-50-50 케이스

100-50-50 케이스								
SCFM	AV PA	AV PB	AV PC	Test_TS-Tair	RSairA	RSairB	RSairC	Est TS-Tair
200	243.13	628.00	248.82	12.40	0.003512	0.010259	0.01884	11.98544
60	244.56	630.18	250.81	34.50	0.014999	0.030324	0.04176	33.85831

[0384]

표 69

SCFM	AV PA	test_TS- Tair	Est TS-Tair	est TAS=RA_AS* PA+RA_ACS* PC-RSairB*PB	G+0.009*PX	TEST dTAS	Tair	ESTIM TA(case)	TEST TA(case)
200	243.13	12.4	11.99	0.96392	3.15	4.1	31.2	46.34	47.5
60	244.56	34.5	33.86	-5.41001	-3.21	-1.02	31	61.65	64.7
SCFM	AV PB	test_TS- Tair	Est TS-Tair	est TBS=RB_BS*PB + RC_BCS*PC + RSairA*PA	G+0.009*PX	test dTBS	Tair	ESTIM TB(case)	TEST TB(case)
200	628	12.4	11.99	18.42326	24.08	21.4	31.2	67.26	65
60	650.18	34.5	33.86	27.27011	33.12	31.6	31	97.98	97
SCFM	AV PC	test_TS- Tair	Est TS-Tair	estTCS= RB_CBS * PB + RC_CS*PC + RA_ CAS*PA	G+0.009*PX	test dTCS	Tair	ESTIM TC(case)	TEST TC(case)
200	248.82	12.4	11.99	1.12978	3.37	4.4	31.2	46.55	48
60	250.81	34.5	33.86	-1.27066	0.99	4.89	31	65.84	70.3

[0385]

[0386]

위에서 제공된 데이터에 기초할 경우, TA, TB, 및 TC에 대한 추정 값들이 측정된 온도 값들에 매우 근접해 있다는 것을 알 수 있다. 또한, USL 값들 및 회귀 등식들이 파라미터들 RB_BS, RC_BCS, RB_CBS, RC_CS, RA_CAS, RA_AS, RA_CAS를 위해 생성될 수 있다. 앞서와 같이, 이들 파라미터들에 대한 USL 값들은 이들 파라미터들의 과대 추정을 방지하고, 이에 따라 접합 온도들의 과대 추정을 방지하기 위하여 사용될 수 있다.

[0387]

RCA, RA, RC, RBC, 및 RB에 대한 USL 값들이 위의 표 24에 나타나 있다. RSairA, RSairB, 및 RSairC에 대한 USL 값들은 위의 표 57-58에 나타나 있다. RCA, RA, RC, RBC, RB, RSairA, RSairB, 및 RSairC에 대한 USL 값들은 등식들 5.15, 5.16, 5.18, 5.19, 5.20, 5.22, 및 5.23을 사용하여 RB_BS, RC_BCS, RB_CBS, RC_CS, RA_CAS, RA_AS, RA_CAS에 대한 USL 값들을 결정하기 위하여 사용될 수 있다. 예를 들어, 등식 5.15은 아래의 표 71에 나타난 바와 같은, RB_BS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 71

$RB_BS = RB - RSairB$

RB_BS = RB-RSairB			
SCFM	USL RB	USL RSairB	USL RB_BS
200	0.050850	0.016680	0.034170
150	0.057547	0.021303	0.036244
100	0.071985	0.030223	0.041763
60	0.094386	0.047656	0.046730
35	0.128310	0.070825	0.057485
0	0.458063	0.428020	0.030044

[0388]

[0389] 등식 5.16은 아래의 표 72에 나타낸 바와 같은 RC_BCS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 72

$RC_BCS=RBC-RSairC$

RC_BCS=RBC-RSairC			
SCFM	USL RBC	USL RSairC	USL RC_BCS
200	0.006450	0.012606	-0.006156
150	0.013248	0.015729	-0.002481
100	0.020643	0.018749	0.001894
60	0.034592	0.024883	0.009709
35	0.064947	0.037567	0.027380
0	0.738187	0.162026	0.576161

[0390]

[0391] 등식 5.18은 아래의 표 73에 나타낸 바와 같은 RB_CBS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 73

$$RB_CBS = RCB - RSairB$$

RB_CBS=RCB-RSairB			
SCFM	USL RCB	USL RSairB	USL RB_CBS
200	0.006450	0.016680	-0.010230
150	0.013248	0.021303	-0.008054
100	0.020643	0.030223	-0.009580
60	0.034592	0.047656	-0.013064
35	0.064947	0.070825	-0.005878
0	0.738187	0.428020	0.310167

[0392]

[0393] 등식 5.19는 아래의 표 74에 나타낸 바와 같은 RC_CS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 74

$$RC_CS = RC - RSairC$$

RC_CS=RC-RSairC			
SCFM	USL RC	USL RSairC	USL RC_CS
200	0.044130	0.012606	0.031524
150	0.051292	0.015729	0.035563
100	0.067135	0.018749	0.048386
60	0.085785	0.024883	0.060902
35	0.111029	0.037567	0.073462
0	0.379574	0.162026	0.217548

[0394]

[0395] 등식 5.20은 아래의 표 75에 나타낸 바와 같은 RA_CAS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 75

$$RA_CAS = RCA - RSairA$$

RA_CAS=RCA-RSairA			
SCFM	USLRCA	USL RSairA	USL RA_CAS
200	0.008750	0.011184	-0.002434
150	0.011584	0.014495	-0.002911
100	0.016271	0.020723	-0.004452
60	0.026626	0.035519	-0.008893
35	0.042483	0.055873	-0.013390
0	0.283475	0.332698	-0.049223

[0396]

[0397] 등식 5.22는 아래의 표 76에 나타낸 바와 같은 RA_AS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 76

$$RA_AS = RA - RSairA$$

RA_AS=RA-RSairA			
SCFM	USL RA	USL RSairA	USL RA_AS
200	0.055510	0.011184	0.044326
150	0.064519	0.014495	0.050024
100	0.084447	0.020723	0.063724
60	0.112248	0.035519	0.076729
35	0.139661	0.055873	0.083788
0	0.477457	0.332698	0.144759

[0398]

[0399] 등식 5.23은 아래의 표 77에 나타낸 바와 같은 RA_ACS에 대한 USL 값들을 얻기 위해 사용될 수 있다.

표 77

RA_ACS=RBC-RSairC

RA_ACS=RBC-RSairC			
SCFM	USL RBC	USL RSairC	USL RA_ACS
200	0.006450	0.012606	-0.006156
150	0.013248	0.015729	-0.002481
100	0.020643	0.018749	0.001894
60	0.034592	0.024883	0.009709
35	0.064947	0.037567	0.027380
0	0.738187	0.162026	0.576161

[0400]

[0401] 일 실시예에서는, 상기 파라미터들에 관하여 획득된 USL 값들에 대하여 회귀 기술들이 적용될 수 있다. 상기 표 71 내지 77에 나타낸 예시적 데이터를 사용하는 경우, 다음의 회귀 등식들이 얻어질 수 있다.

[0402]

$$RB_BS = 0.0312 + 0.0693 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/24.88) +$$

[0403]

$$0.022 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/99.5) \quad \text{eq. 5.25}$$

[0404]

$$RC_BCS = -2.66\text{E-}2 + 0.5682 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/10.37) +$$

[0405]

$$0.0396 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/302) \quad \text{eq. 5.26}$$

[0406]

$$RB_CBS = -0.00929 + 0.31975 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/7.8) \quad \text{eq. 5.27}$$

[0407]

$$RC_CS = 0.0299 + 0.0895 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/59.1) +$$

[0408]

$$0.087 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/13.5) \quad \text{eq. 5.28}$$

[0409]

$$RA_CAS = -2.19\text{E-}3 - 0.0418 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/18) -$$

[0410]

$$0.018 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/46.29) \quad \text{eq. 5.29}$$

[0411]

$$RA_AS = 4.63\text{E-}02 + 0.1356 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/57) -$$

[0412]

$$0.0358 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/84.5) \quad \text{eq. 5.30}$$

[0413]

$$RA_ACS = -1.84\text{E-}2 + 0.0338 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/200.6) +$$

[0414]

$$0.5032 * \text{EXP}(-\text{SCFM}/11.4) \quad \text{eq. 5.31}$$

[0415]

열용량들과 관련하여, 150SCFM에서 190초인 열적 시간 상수 τ 에 있어서는, 표 78에 나타낸 테스트 데이터가 제공될 수 있다.

표 78

SCFM=150에 있어서 : $\tau=190$ 초

SCFM=150에 있어서 : $\tau=190$ 초				
		RB_BS = RB-RSairB		
RB	RSair_B	RB_BS	Cth=190/Rth	
0.053044	0.0131241	0.0399199	4760	
		RC_BCS=RBC-RSairC		
RBC	RSairC	RC_BCS	Cth=190/Rth	
0.005823	0.0236763	-0.0178533	-10642	0
		RB_CBS=RBC-RSairB		
RBC	RSairB	RB_CBS	Cth=190/Rth	
0.005823	0.0131241	-0.0073011	-26023	0
		RC_CS=RC-RSairC		
RC	RSairC	RC_CS	Cth=190/Rth	
0.057398	0.0236763	0.0337217	5634	
		RA_CAS=RCA-RSairA		
RCA	RSairA	RA_CAS	Cth=190/Rth	
0.008588	0.0047253	0.0038627	49188	0
		RA_AS=RA-RSairA		
RA	RSairA	RA_AS	Cth=190/Rth	
0.057398	0.0047253	0.0526727	3607	
		RA_ACS=RBC-RSairC		
RBC	RSairC	RA_ACS	Cth=190/Rth	
0.005823	0.0236763	-0.0178533	-10642	0

[0416]

[0417]

표 78로부터 -ve Cth가 냉각 영향을 나타내고 있지만, -ve Cth는 물리적 의미를 갖지 않으며, 따라서 이들 Cth는 즉각적인 영향을 나타내는 $0(Cth=0 \text{ J/}^\circ\text{C})$ 이라는 것이 인식될 것이다. 또한, 150SCFM 상의 테스트 데이터를 사용하는, RA_CAS가 작은 수로 나타나 있지만, 모든 SCFM에 대한 USL들은 음수(negative number)들이다. 따라서, CA_CAS가 또한 0으로 취급되어야 한다. 이것은 0인 위상들 사이의 인터페이스(interphase)들의 정전 용량을 만들게 된다. 여기서 도출된 열 임피던스 함수는 실시간 접합 온도들을 결정하기 위해 사용될 수 있다. 예를 들어, 전술한 열 임피던스 함수들은 시스템 제어기(1702)(도 17) 내에 프로그래밍될 수 있다.

[0418]

도 20은 듀얼 H-브리지에서 IGBT들의 접합 온도를 추정하는 회로의 블록도이다. 당업자는 도 20에 나타난 디바이스들 및 기능 블록들이 회로를 포함하는 하드웨어 요소들, 비-일시적, 기계-판독가능 매체에 저장된 컴퓨터 코드를 포함하는 소프트웨어 요소들, 또는 하드웨어 요소와 소프트웨어 요소의 조합을 포함할 수 있다는 것을 이해할 것이다. 또한, 접합 온도 추정 회로(2000)의 기능 블록들과 디바이스들은 본 발명의 예시적 실시예로 구현될 수 있는 기능 블록들 및 디바이스들 중의 일 예일 뿐이다. 당업자는 특정 응용에 대한 설계 고려사항들에 기초하여 특정 기능 블록들을 용이하게 규정할 수 있을 것이다.

[0419]

추정 접합 온도들은 듀얼 H-브리지의 동작의 각종 양태들을 제어하는데 사용될 수 있다. 일 실시예에서는, 인가된 부하 전류가 예를 들어, 듀얼 H-브리지를 구동하는데 사용된 제어 신호들을 수정하는 것에 의하여, 추정 접합 온도들에 기초하여 수정될 수 있다. 일 실시예에서는, 모터에 전력을 공급하도록 듀얼 H-브리지가 동작가능

하게 커플링되어 있는 트랙션 모터를 제어하는 프로세스에서 추정 접합 온도들이 사용될 수 있다. 일 실시예에서는, 듀얼 H-브리지에 동작가능하게 커플링되어 있는 냉각 유닛을 제어하기 위하여 추정 접합 온도들이 사용될 수도 있다. 일 실시예에서는, 듀얼 H-브리지의 공간적, 열적, 및/또는 전기적 토폴로지가 추정 접합 온도들에 기초하여 수정될 수 있다.

[0420] 도 20에 도시된 바와 같이, 접합 온도 추정 회로(2000)에 대한 입력들은 각각의 위상들, 공기 흐름률, 및 주변 공기 온도에서의 IGBT들 및 다이오드들에 대한 전력들을 포함할 수 있다. 접합 온도 추정 회로(2000)의 출력은 각 위상들의 IGBT들의 접합 온도들일 수 있다. 접합 온도 추정 회로(2000)에 의해 수행되는 접합 온도 계산들은 전술한 열 임피던스 등식들에 기초하는 것일 수 있다. 일 실시예에서, 접합 온도 추정 회로(2000)는 스위치 (2002)를 포함할 수 있다. 도 20이 제어 로직 카드의 마이크로프로세서에 의해 3개의 상이한 위상들(TjA, TjB 및 TjC)로 IGBT들의 접합 온도의 실시간 추정에 관한 블록도를 나타내는 실시예들에서, 추정 로직 내의 이 스위치는 소프트웨어로 구현될 수 있다. 온도 센서(1700)가 적절하게 작동하고 있는 경우, 이 스위치는 위치 1에 존재할 수 있다. 온도 센서(1700)가 적절하게 작동하고 있지 않은 경우, 이 스위치는 위치 2에 존재할 수 있다.

[0421] 그 결과들을 검증하기 위하여, TjB, TjC, TjA(아래에서는 그 결과들이 센서 온도를 추정하는 것에 의해 획득되었다는 것을 나타내기 위해 TjBS, TjCS 및 TjAS로 표시됨)가 Tair로부터 직접 추정되어서, 센서에 대한 TSair 및 델타 TBcase, 센서에 대한 델타 TCcase 및 센서에 대한 델타 TAcase를 추정하는 것에 의해 얻어진 값들과 비교된다. 테스트들의 결과들이 아래의 표 79에 나타나 있다. 표 79에 나타난 테스트 결과들에 있어서, Vbatt = 80V 이고, Tair = 61 °C 이다.

표 79

Vbatt = 80V, Tair = 61 °C를 가진 안정 상태 명세들

				Tair로부터 직접 추정			Estim. Tsens & TjS		
Vlink	SCFM	Ifield	Ibatt	TjB	TjC	TjA	TjBS	TjCS	TjAS
1500	198	125	300	116.16	126.31	100.72	115.96	129.41	102.34
1300	198	400	300	125.76	119.2	108.09	125.43	122.31	110.55
875	198	400	300	117.22	104.71	95.34	116.92	107.13	97.01
700	198	325	380	118.96	105.46	88.74	118.64	107.83	89.86
400	113	200	380	122.57	112.55	86.96	122.01	111.97	87.54
300	85	175	225	107.19	99.36	83.76	105.89	98.72	84.20
250	71	125	225	107.63	100.52	82.3	104.86	98.53	82.04

[0422]

[0423] 표 79의 데이터로부터 알 수 있는 바와 같이, 2 세트의 결과들은 수 °C 이내에 있으며, 접합 온도들을 결정하기 위해 사용된 등식들이 듀얼 H-브리지 컨버터의 열적 거동에 대해 매우 양호한 추정을 제공하고 있다는 것을 증명하고 있다. 일 실시예에서는, 실시간, 측정 또는 추정 접합 온도들이 듀얼 H-브리지의 관련 냉각 유닛에 대한 공기 흐름률을 제어하기 위해 듀얼 H-브리지 제어기에 의해 사용될 수 있다.

[0424] 전력 전자 반도체들의 발달은 감소된 전력 소모와 증가된 접합 온도(Tj) 능력을 가진 IGBT들과 같은 디바이스들을 제공하고 있다. 최신 세대의 IGBT(Isolating Gate Bipolar Transistor)들은 훨씬 감소된 전력 소모를 가지며, 그 결과 훨씬 더 많은 전력을 핸들링하는 능력을 구비하고 있다. 그러나, 개선된 전력 핸들링 능력들은 몇몇 추가적인 제약사항들을 부과한다. IGBT들의 접합을 동작시키는 온도 상한이 증가됨에 따라, 그것은 또한 디바이스의 서멀 사이클링을 증가시키게 되고, 이것은 장기적으로 추가 안전장치 부재로 인한 신뢰성 저하를 야기할 수 있다.

[0425] 일반적으로, IGBT의 서멀 사이클링 능력을 제한하는 2개의 인자들, 즉 베이스 플레이트 솔더링(base plate soldering) 및 본드 와이어(bond wires)가 존재하며, 양쪽 모두는 서멀 사이클링으로 인해 피로(fatigue)를 받게 된다. 베이스 플레이트 솔더링 신뢰성은 부분적으로 그 베이스 플레이트의 재료에 의존한다. 일 실시예에서, 베이스 플레이트 솔더링은 "AlSiC"으로 지칭되는 금속 기질 복합체를 사용할 수 있으며, 이것은 실리콘 카바이드 입자를 가진 알루미늄 기질을 포함하며 더 큰 서멀 사이클링 내구성을 제공한다. IGBT 패키지 내부의 칩들을 상호연결시키는 알루미늄 와이어들의 내구성을 증가시키기 위해, 와이어들은 코팅될 수 있다.

[0426] 도 21은 추정된 소망 냉각량에 기초하여 공기 흐름률을 제어하는 듀얼 H-브리지에 대한 시스템 제어기의 블록도이다. ALC(auxiliary logic controller)로서 지칭되는 듀얼 H-브리지 제어기는 그것이 제어하는 IGBT들의 접합

온도를 실시간으로 계산할 수 있으며, 요구되는 냉각 레벨("SCFM(Standard Cubic Feet per Minute)"로)을 결정할 수도 있다. 듀얼 H-브리지 제어기는 서멀 사이클링을 감소시킬 요구되는 냉각 레벨을 결정할 수 있으며, 이에 따라 IGBT 모듈들의 열적 피로를 감소시킨다. 요구되는 냉각 레벨은 개개의 듀얼 H-브리지 제어기(ALC)로부터 시스템 제어기로 전달될 수 있으며, 상기 시스템 제어기는 그 시스템 내의 모든 개개 컨버터들의 더 큰 요구되는 냉각 레벨을 선택하고, 이 냉각 레벨을 베이스로 하여 공기 흐름을 제공하는 송풍기 장비의 제어기로 명령을 제공한다.

[0427] 도 21에 도시된 바와 같이, 듀얼 H-브리지 제어기는 신호들 dTBjc, dTCjc, PB, 및 PC를 시스템 제어기로 전송하며, 여기서 dTBjc = 공기에 대한 케이스 B의 온도차, dTCjc = 공기에 대한 케이스 C의 온도 차이이다.

[0428] 시스템 제어기는, ALC에 의해 수신된 신호들에 기초하여, 각 위상 아래의 히트싱크와 냉각 공기 사이의 요구되는 유효 열저항들, RB* 및 RC*를 추정한다. RBt 및 RCt가 3-시그마 허용오차(Z=3)를 가능하게 하는 것에 의해 테스트 데이터로부터 직접 도출되었기 때문에, RB* 및 RC*의 값들은 전술한 RBt 및 RCt 값들과 유사하지만, 그보다 약간 더 클 수도 있다. 상기 시뮬레이션의 나머지와 병립할 수 있도록 하기 위해, RB* 및 RC*는 통계적 모델링의 사용으로 확대된 표준 편차를 갖는 RB, RBC, RC 및 RCA의 USL들로부터 도출되며, 그 결과 RB* 및 RC*에 대한 더 큰 값들을 야기하게 된다.

[0429] 등식 3.1로부터:

$$[0430] \quad TB-Tair = dTB = RB * PB + RBC * PC + RBA * PA$$

[0431] 등식 3.1에서, dTB에 대한 PA의 어떠한 의미 있는 기여도 존재하지 않기 때문에 RBA는 0이다.

[0432] 따라서:

$$[0433] \quad TB-Tair = dTB = RB * PB + RBC * PC$$

[0434] 등식 3.2로부터:

$$[0435] \quad TC-Tair = dTC = RC * PC + RBC * PB + RCA * PA$$

[0436] RCA, RA, RC, RBC, 및 RB에 대한 USL 값들이 표 24에 나타나 있다. RB*에 대한 계산들을 단순화시키기 위하여, $RB \gg RBC$ 이므로, 전력 $P_o = \max(PB, PC)$ 가 사용되어 요구되는 RthB_ha(요구되는 RB*)를 추정하도록 할 수 있다. 이 단순화를 적용하면 다음이 산출된다:

$$[0437] \quad TB-Tair = RB* * P_o = RB * P_o + RBC * P_o = P_o * (RB + RBC)$$

[0438] RB*에 대한 해는 다음을 따른다:

$$[0439] \quad RB* = RB + RBC \quad \text{eq. 7.1}$$

[0440] 따라서:

$$[0441] \quad RB* * P_o = RB * P_o + RBC * P_o = P_o * (RB + RBC)$$

[0442] 마찬가지로, RC*에 있어서는, $PA < \max(PB, PC)$ 이기 때문에, RC*가 다음과 같이 단순화될 수 있다:

$$[0443] \quad RC* = RC + RBC + RCA \quad \text{eq. 7.2}$$

[0444] RB* 및 RC*에 대한 USL 값들이 생성될 수 있으며, 이것이 표 81 및 82에 나타나 있다.

표 81

eq. 7.2: $RB^* = RB + RBC$

SCFM	USL RB	USL RBC	USL RB*
200	0.050850	0.006450	0.057300
150	0.057547	0.013248	0.070795
100	0.071985	0.020643	0.092628
60	0.094386	0.034592	0.128977
35	0.128310	0.064947	0.193258
0	0.458063	0.738187	1.196250

[0445]

표 82

eq. 7.2 : $RC^* = RC + RBC + RCA$

SCFM	USL RC	USL RBC	USL RCA	USL RC*
200	0.044130	0.006450	0.008750	0.059330
150	0.051292	0.013248	0.011584	0.076125
100	0.067135	0.020643	0.016271	0.104049
60	0.085785	0.034592	0.026626	0.147003
35	0.111029	0.064947	0.042483	0.218460
0	0.379574	0.738187	0.283475	1.401236

[0446]

[0447] 표 81 및 82로부터의 USL 값들에 기초할 경우, 0 SCFM의 공기 흐름률에서 USL 값들은 이상점들(out-liers)로 나타난다는 것이 인식될 것이다. 요구되는 공기 흐름률을 RB^* 및 RC^* 의 함수로 기술하는 회귀 등식들은 RC^* 및 RB^* 에 관한 USL 값들에 회귀 기술을 적용하는 것에 의해 생성될 수 있다. 이러한 기술들을 표 81 및 82에 나타난 예시적 USL 데이터에 적용함으로써 다음이 산출된다:

[0448]
$$\text{req.SCFM}_B = 36.43 + 769.62 \cdot \text{EXP}(-RB^*/0.037) \quad \text{eq. 7.3}$$

[0449]
$$\text{req.SCFM}_C = 34.95 + 591.2 \cdot \text{EXP}(-RC^*/0.0465) \quad \text{eq. 7.4}$$

[0450] 상기 등식들에서, SCFM_B 및 SCFM_C 는 각각 위상 B와 C의 신뢰할 수 있는 동작을 위해 요구되는 공기흐름 값들이다. 도 21에 도시된 바와 같이, 시스템 제어기는 위에서 나타난 회귀 등식들을 적용하여 그것의 제어하에 듀얼 H-브리지에 가해진 공기흐름을 제어하도록 구성될 수 있다.

[0451] 위상 B 또는 위상 C의 전력 소모는 여기서 P_X 로 지칭될 수 있으며, 여기서 X는 B 또는 C일 수 있다. 위상 A 또는 위상 B의 접합 온도는 여기서 T_{jX} 로 지칭될 수 있으며(여기서 X는 A 또는 B일 수 있음), 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0452]
$$T_{jX} = T_{air} + dTha + dTch + dTjc$$

[0453] 상기 등식에서, $dTha$ 는 히트싱크와 공기 사이의 온도 차를 나타내고, $dTch$ 는 IGBT 케이스와 히트싱크 사이의 온도 차를 나타내며, $dTjc$ 는 IGBT의 접합과 그 케이스 사이의 온도 차를 나타낸다. 파라미터들 $dTha$ 및 $dTch$ 는 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0454]

$$dT_{ha} = P_X * R_{X^*}$$

[0455]

$$dT_{ch} = (P_X/2) * 0.018 = P_X * 0.009$$

[0456]

따라서, T_{jX} 에 대한 등식은 다음과 같이 표현될 수 있다:

[0457]

$$T_{jX} - T_{air} = P_X * R_{X^*} + dT_{Xjc} + P_X * 0.009 \quad \text{eq. 7.5}$$

[0458]

R_{X^*} 에 대한 해는 다음을 따른다:

[0459]

$$R_{X^*} = [(T_{jX} - T_{air}) - dT_{Xjc}] / P_X - 0.009 \quad \text{eq. 7.6}$$

[0460]

따라서, R_{B^*} 및 R_{C^*} 의 값들은 특정 응용에 대해 적절한, 명시되어 있는 최대 서멀 사이클링 가이드라인에 기초하여 계산될 수 있다. 일 실시예에서, 위상 B의 최대 서멀 사이클링($T_{jX} - T_{air}$)이 대략 64.5 °C인 것으로 명시될 수 있고, 위상 C의 최대 서멀 사이클링($T_{jX} - T_{air}$)이 대략 68.5 °C인 것으로 명시될 수 있으며, 이것은 다음을 산출한다:

[0461]

$$R_{B^*} = (64.5 - dT_{Bjc}) / P_B - 0.009 \quad \text{eq. 7.7}$$

[0462]

$$R_{C^*} = (68.5 - dT_{Cjc}) / P_C - 0.009 \quad \text{eq. 7.8}$$

[0463]

사용된 사이클링 레벨들(64.5 및 68.5)의 설명에 대해서는, 아래의 표 84 및 85를 참조한다.

[0464]

도 21은 신뢰할 수 있는 동작을 위해 듀얼 H-브리지에 의해 요구되는 공기 흐름(SCFM)의 실시간 추정에 사용된, 등식 7.3, 7.4, 7.7 및 7.8에 기초하는, 논리도를 나타낸다. 상기 레이팅(rating)(정상 상태 조건들)에서 $V_{batt} = 80V$, $T_{air} = 61^{\circ}C$ ($T_{amb} = 49^{\circ}C$)에 대한 접합 온도 시뮬레이션을 실행하면 아래의 표 83에 나타난 접합 온도들이 산출된다. 표 내의 "공기 흐름"은 V_{link} 의 특정 값들에서 획득될 수 있는 최대 공기 흐름을 나타낸다.

표 83

상기 레이팅(정상 상태) 조건들에서 $V_{batt} = 80V$,
 $T_{air} = 61^{\circ}C$ ($T_{amb} = 49^{\circ}C$)에 대한 접합 온도 시뮬레이션

V_{link}	Air Flow	I_{batt}	I_{field}	P_B	P_C	P_A	T_{jB}	T_{jC}	T_{jA}
dc Volts	SCFM	A	A	W	W	W	°C/W	°C/W	°C/W
1500	198	300	125	677.58	921.38	461.92	115.96	129.41	102.34
1300	198	300	400	882.19	779.72	590.54	125.43	122.31	110.54
700	198	380	325	742.36	624.08	328.25	118.64	107.83	89.86
400	113	380	200	595.23	483.1	191.65	122.01	111.97	87.54

[0465]

[0466]

상기로부터, V_{link} , I_{field} 및 $I_{battery}$ 의 조합을 동작시키는 최악 경우의 정상 상태는 아래의 표 84 및 85에 나타난 바와 같이 결정될 수 있다. 구체적으로, 위상 B에 대한 조합을 동작시키는 최악 경우의 정상 상태가 표 84에 나타나 있고, 위상 C에 대한 조합을 동작시키는 최악 경우의 정상 상태는 표 85에 나타나 있다.

표 84

For phase B:					
V_{link}	I_{field}	$I_{battery}$	P_B	T_{jB}	$T_{jB} - T_{air} \text{ (cycling)}$
1300V	400A	300A	882.19W	125.5degC	64.5 degC

[0467]

표 85

For phase C:					
V_{link}	I_{field}	$I_{battery}$	P_C	T_{jC}	$T_{jC} - T_{air} \text{ (cycling)}$
1500V	125A	300A	921.38W	129.5degC	68.5degC

[0468]

[0469] 위의 제공된 예에서, 위상 B 소모가 PB이고 TBJ 와 케이스 B 사이의 열 차이가 dTBjc인 동작 시점에서, 등식 7.7에 의해 주어진 RB* 값은 64.5 °C 이하의 서멀 사이클링을 제공하게 된다. 마찬가지로, 위상 C 소모가 PC이고 TCj 와 케이스 C 사이의 열 차이가 dTCjc인 동작 시점에서, 등식 7.7에 의해 주어진 RC* 값은 68.5 °C 이하의 서멀 사이클링을 제공하게 된다.

[0470] 도 21에 도시된 바와 같이, 파라미터 RB*는 등식 7.3을 통하여 요구되는 SCFM_B를 결정하기 위해 사용될 수 있고, 파라미터 RC*는 등식 7.4를 통하여 요구되는 SCFM_C를 결정하기 위해 사용될 수 있다. 시스템 제어기는 양 쪽 모두의 위상들에 대해 요구되는 공기 흐름을 제공하기 위해서, 두 값들 중 더 큰 값을 선택할 수 있다. 전술한 바와 같이, 위상 A는 위상 A 및 위상 B 보다 항상 더 냉각되어 있게 된다.

[0471] 전술한 방법을 테스트하기 위해, 도 21의 시스템은 예를 들어 매트랩(Matlab)을 사용하여 컴퓨터 모델링될 수 있다. 도 21의 시스템을 모델링함으로써 표 86에 나타난 테스트 결과들이 산출되었으며, 이것은 전체 범위의 Tair에서 정상 상태 가이드라인들에 대해 획득되었다:

표 86

SFC 감소를 위한 100%

phC					EVO_VENTHATION_012011.mdt						
Vlink	Avail. SCFM	Ibatt	Ifield	Tair	TJB	TJB-Tair	reqSCFM(B)	TJC	TJC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM
dc Volts	SCFM	A	A	°C	°C	°C	SCFM	°C	°C	SCFM	SCFM
1500	198	300	125	61	115.96	54.96	140.34	1	68.41	213.39	198
1500	198	300	125	50	103.57	53.57	133.41	7	66.97	208.01	198
1500	198	300	125	30	81.06	51.06	121.12	94.36	64.36	198.18	198
1500	198	300	125	10	60.01	50.01	108.82	73.21	63.21	188.26	188.26
1500	198	300	125	-10	39.18	49.18	97.22	52.13	62.13	176.89	176.89
1500	198	300	125	-40	11.97	51.97	100.70	22.57	62.57	163.60	163.6
1300	198	300	400	61	125.43	64.43	199.72	1	61.31	167.65	198
1300	198	300	400	50	114.06	64.06	191.49	2	61.22	163.81	191.49
1300	198	300	400	30	94.00	64.00	177.06	91.74	61.74	157.06	177.06
1300	198	300	400	10	74.04	64.04	152.89	72.43	62.41	149.62	162.89
1300	198	300	400	-10	54.12	64.12	149.05	53.06	63.06	141.04	149.05
1300	198	300	400	-40	24.35	64.35	129.87	25.05	65.05	128.74	129.87
700	198	380	325	61	123.90	62.90	189.73	2	61.52	114.84	189.73
700	198	380	325	50	112.83	62.83	162.86	9	61.79	111.55	162.86
700	198	380	325	30	92.75	62.75	150.55	82.45	62.45	105.69	150.55
700	198	380	325	10	72.73	62.73	135.04	63.19	63.19	100.12	135.04
700	198	380	325	-10	52.73	62.73	126.70	43.94	63.94	94.68	126.7
700	198	380	325	-40	23.01	63.01	115.22	16.76	66.76	91.21	115.22
400	113	380	200	61	123.05	62.05	109.66	7	62.07	75.32	109.66
400	113	380	200	50	112.07	62.07	105.32	5	62.55	73.44	105.32
400	113	380	200	30	92.13	62.13	97.65	83.46	63.46	70.11	97.65
400	113	380	200	10	72.20	62.20	90.73	64.34	64.34	67.02	90.73
400	113	380	200	-10	52.27	62.27	84.75	45.20	65.2	64.08	84.75
400	113	380	200	-40	22.58	62.58	77.15	17.25	67.25	61.71	77.15

[0472]

[0473] 표 86에서, 좌측으로부터 제 2 열은 송풍기 장비로부터 사용가능한 공기 흐름을 나타낸다. 표 86에 나타난 바와 같이, reqSCFM가 사용가능한 SCFM보다 큰 경우에는, 사용가능한 공기 흐름이 적용된다. 또한, 등식들 7.7 및 7.3을 사용하여 계산된, 요구되는 공기흐름(reqSCFM)은 Vlink = 1300V 이 된다는 것이 표 86의 데이터로부터 알 수 있다. 그러나, 1300V 초과에서 이들 2개의 등식들을 사용하는 것은 요구되는 공기흐름의 과대 추정을 야기하게 된다. 그러나, 1300V 초과에서 송풍기는 사용가능한 최대 공기흐름, 즉 198 SCFM에 근접하거나 그 조건에서

동작 될 것이다. 이러한 관측사항들에 기초할 경우, 도 21에 나타난 시스템은 도 22에 나타난 바와 같이 단순화 될 수 있다.

[0474] 도 22는 추정되는 냉각 요구량에 기초하여 공기 흐름률을 제어하는 듀얼 H-브리지에 대한 시스템 제어기의 블록 도이다. 도 22에 도시된 바와 같이, 듀얼 H-브리지는 단일의 요구되는 냉각 레벨(dTjc)과 단일의 전력(P)을 전송한다. 듀얼 H-브리지는 dTjc 및 P의 값들이 위상 B 또는 위상 C에 기초하게 될 것인지의 여부를 결정하는 로직을 포함한다. 예를 들어, PB가 PC보다 큰 경우에는, dTjc 및 P가 위상 B에 기초하게 된다. 그렇지 않은 경우에는, dTjc 및 P가 위상 C에 기초하게 된다. 시스템 제어기가 듀얼 H-브리지 제어기로부터 2개의 신호들을 수신하기 때문에, 시스템 제어기회로는 도 22에 나타난 바와 같이 단순화될 수 있다.

[0475] 도 22의 단순화된 시스템이 듀얼 H-브리지의 능력을 제한하지 않는다는 것을 확인하기 위해, 1300V 미만에서 두 기술들이 동일한 결과를 제공하였기 때문에, 상기 시스템은 Vlink >= 1300V 으로 모델링 될 수 있다. 1300V, 1400V 및 1500V에서의 듀얼 H-브리지의 능력은 20℃의 주변 공기 온도(Tair = 32 ℃)에 대해 도출되었으며, 이것은 68.5 ℃ 초과인 서멀 사이클링은 바람직하지 않다는 사실에 기반하였다. 따라서, 다음 테스트 케이스들은 주어진 Vlink에 대한 2 전류들 중의 하나의 최대 부하를 고정하고, 서멀 사이클링이 대략 68.5℃이 될 때까지 다른 것을 재조정하는 것에 의해 모델링 되었다. 상기 테스트들은 도 21에 나타난 본래의 시스템과 도 22에 나타난 단순화된 시스템을 가지고 반복되었다. 테스트 결과들이 아래의 표 87에 나타나 있다.

표 87

상기의 사항이 본래 방법과 새로 제안된 단순화된 방법을 가지고 반복됨:

		phC	phA		ORIGINAL						
Vlink	Avail. SCFM	Ibatt	Ifield	Tair	TJB	TJB-Tair	reqSCFM(B)	TjC	TjC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM
de Voits	SCFM	A	A	°C	°C	°C	SCFM	°C	°C	SCFM	SCFM
1500	198	343	125	32	86.56	54.56	137.6	100.49	68.49	216.46	198
1400	198	380	270	32	94.61	62.61	183.76	100.45	68.45	209.55	198
1400	198	340	450	32	100.8	68.8	221.92	99.08	67.08	194.18	198
1300	198	365	450	32	100.45	68.45	221.15	96.32	64.32	182.54	198
1300	198	380	425	32	100.45	68.45	220.42	97.38	65.38	188.58	198

					SIMPLIFIED						
Vlink	Avail. SCFM	Ibatt	Ifield	Tair	TJB	TJB-Tair	TjC	TjC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM	
de Voits	SCFM	A	A	°C	°C	°C	°C	°C	SCFM	SCFM	
1500	198	343	125	32	86.56	54.56	100.49	68.49	232.14	198	
1400	198	380	270	32	94.61	62.61	100.45	68.45	223.27	198	
1400	198	340	450	32	100.8	68.8	99.08	67.08	221.92	198	
1300	198	365	450	32	100.45	68.45	96.33	64.33	221.15	198	
1300	198	380	425	32	100.45	68.45	97.38	65.38	220.42	198	

[0476]

[0477] 표 27에 나타난 결과들에 기초할 경우, 어느 하나의 시스템을 사용하는 듀얼 H-브리지의 "능력"에 차이가 없다는 것을 알 수 있다. 그러나, 단순화된 시스템은 PB < PC 인 2개의 케이스들(첫번째 2개의 행들)에 대한 더 큰 요구되는 공기 흐름을 계산하였다. 그러나, 본 예에서 최대 사용가능한 공기 흐름률은 198 SCFM이기 때문에, 2개의 시스템은 동일하게 거동하였다.

[0478] 아래의 표 88에 나타난 추가의 테스트 케이스들은 도 22의 시스템이 PB < PC 인 경우 더 큰 요구되는 공기 흐름을 계산할 지의 여부를 결정하기 위해 수행되었다.

표 88

Vlink	Avail. SCFM	phC	phA	Tair	ORIGINAL						
					TjB	TjB-Tair	reqSCFM(B)	TjC	TjC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM
					°C	°C	SCFM	°C	°C	SCFM	SCFM
dc Volts	SCFM	A	A	°C	95.59	63.59	137.26	97.99	65.99	140.77	140.77
1400	198	190	350	32					PB=669.74	<	PC=693.72
1400	198	325	325	32	94.79	62.79	177.46	97.96	65.96	188.22	188.22
									PB=768.97	<	PC=846.98
1400	198	380	125	32	87.35	55.35	142.66	98.74	66.74	208.88	198
									PB=683.46	<	PC=916.29
1400	198	300	125	32	84.94	52.94	115.96	95.11	63.11	178	178
									PB=613.72	<	PC=813.84

Vlink	Avail. SCFM	phC	phA	Tair	SIMPLIFIED					
					TjB	TjB-Tair	TjC	TjC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM
					°C	°C	°C	°C	SCFM	SCFM
dc Volts	SCFM	A	A	°C	95.81	63.81	98.25	66.25	139.96	139.96
1400	198	190	350	32						
1400	198	325	325	32	93.2	61.2	96.5	64.5	195.9	195.9
1400	198	380	125	32	87.34	55.34	98.74	66.74	222.4	198
1400	198	300	125	32	83.85	51.85	94.05	62.05	183.56	183.56

[0479]

[0480]

표 88에 나타난 바와 같이, 1300V를 초과하는 몇몇 경우들에서, PB<PC 시에, 단순화된 시스템이 요구되는 공기 흐름률을 과대 추정하게 되지만, 이들 고 전압에서는, 요구되는 공기 흐름이 일반적으로 최대 사용가능한 공기 흐름률 198 SCFM 보다 더 크게 된다. Vlink=>1300V 이고 PB<PC 인 다른 시나리오들을 검토하면, 198 SCFM 미만의 요구되는 공기 흐름률들이 6-7 SCFM 미만만큼 달라졌으며, 이것은 미미한 것이다. 1500V의 Vlink에서 최대 (정상 상태) 전류들에 대해 추가 테스트들이 수행되었으며, 이것은 아래의 표 89에 나타나 있다.

표 89

Vlink	Avail. SCFM	phC	phA	Tair	ORIGINAL						
					TjB	TjB-Tair	reqSCFM(B)	TjC	TjC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM
					°C	°C	SCFM	°C	°C	SCFM	SCFM
dc Volts	SCFM	A	A	°C	116	54.96	140.34	129.4	68.41	213.39	198
1500	198	300	125	61							

Vlink	Avail. SCFM	phC	phA	Tair	SIMPLIFIED					
					TjB	TjB-Tair	TjC	TjC-Tair	reqSCFM(C)	req SCFM
					°C	°C	°C	°C	SCFM	SCFM
dc Volts	SCFM	A	A	°C	116	54.96	129.4	68.41	213.39	198
1500	198	300	125	61						

[0481]

[0482]

표 89에 나타난 바와 같이, 요구되는 공기 흐름률 reqSCFM 이 198 SCFM의 규격 상한에 있기 때문에, 두 기술들 사이에 TjB, TjB-Tair, TjC, TjC-Tair의 변경이 존재하지 않는다. 전술한 테스트들에 기초할 경우, 도 22의 단

순화된 시스템은 1300V 이하로부터 도 21의 시스템과 동일하게 수행하는 것으로 나타나는 것을 알 수 있다. 또한, 1300V 초과에서는, 요구되는 공기 흐름률 reqSCFM에 대한 두 시스템들 추정 사이에 의미 있는 차이점이 존재하지 않는다.

[0483] 듀얼 H-브리지의 IGBT의 열적 보호

[0484] 실시예들에서, 시스템 제어기는 공기 냉각, 플레넘에서의 공기-누설, 터널 주행 등을 제공하는 송풍기의 장애와 같은 시스템 고장의 경우에, 듀얼 H-브리지의 IGBT들을 열적으로 보호하도록 구성될 수 있다. 예를 들어, 부하 전류가 하술하는 바와 같이 저하되어 서멀 사이클링을 감소시킬 수 있다.

[0485] 일 예로서, 듀얼 H-브리지에서의 최대 정상 상태 동작 조건들 하에서, 최대 T_j - T_{air} 는 68.5 °C로 지정될 수 있다. 이것은 예를 들어 1500Vdc에서 $I_f=125A$, $I_{batt}=300A$, $T_{air} = 61^{\circ}C$ ($T_{amb}=49^{\circ}C$), $T_{jC} = 129.41^{\circ}C$, 및 $T_{Chs} = 112.32^{\circ}C$ 에서 발생할 수 있다. 이 예에서, T_{Chs} 는 대략 T_{jC} 의 85%이며, 온도 센서(1700)(도 17)에 의해 측정된다. 또한, 1.5 °C의 에러 공차는 온도 센서(1700)의 공차를 감안하도록 지정될 수 있으며, 이것은 대략 1.3%일 수 있다. 따라서, 이 예에서 사용되는 최대 사이클링 온도는 $68.5 + 1.5 = 70^{\circ}C$ 가 된다. 따라서, $T_j = 70 + T_{air}$ 이다. 61 °C의 최대 T_{air} 에서, $T_{jmax} = 131^{\circ}C$ 이다. 위에서 나타낸 값들은 예시적이며, 실제의 구현에 따라 조정될 수 있다는 것이 인식될 것이며, 이것은 시스템의 지리적 위치에 기초하여 달라질 수 있다. 예를 들어, $T_{amb}=55^{\circ}C$ 를 가진 국가들에서, $T_{air\ max} = 55+5+7 = 67^{\circ}C$ 이고, 이것은 137 °C의 T_{jmax} 를 산출한다.

[0486] 위에서 제공된 예시적 값들에 기초할 경우, 본 시스템은 $T_j \geq 137^{\circ}C$ 이 될 때까지 T_j 에 대한 저하가 개시되지 않도록 구성될 수 있다. T_j - T_{air} 가 70 °C보다 커지는 경우($calc\ T_j > 131^{\circ}C$), ALC(Auxiliary Logic Controller)는 IGBT들이 뜨거워졌다는 표시를 발행할 수 있으며, T_j - $T_{air} = 76^{\circ}C$ ($T_j = 137^{\circ}C$)가 될 때까지 어떠한 추가 동작도 취하지 않게 된다. 일 실시예에서, 이 단계는 $T_{amb}=55^{\circ}C$ 를 가진 국가들에서 생략될 수 있다.

[0487] 일 실시예에서, IGBT들의 서멀 사이클링 능력은 델타 $T_j=71^{\circ}C$ 의 75,000 서멀 사이클이며, 델타 $T_j = 86^{\circ}C$ 의 30,000 사이클이다. 그러나, 본 기술들의 실시예들은 다른 서멀 능력들을 가진 IGBT들을 포함할 수 있다는 것이 인식될 것이다. 델타 $T_j = 86^{\circ}C$ 및 $T_{air}=61^{\circ}C$ 를 기초로 할 경우, 듀얼 H-브리지 제어기는 $T_j = 147^{\circ}C$ 또는 T_j - $T_{air} = 86^{\circ}C$ 에서 펄싱(pulsing)을 멈추도록 구성될 수 있다. 이것은 아래에 나타낸 저하 범위를 제공한다:

[0488] $137^{\circ}C \leq T_j < 147^{\circ}C$, 사이즈 10 °C, 또는

[0489] $76^{\circ}C \leq T_j - T_{air} < 86^{\circ}C$, 사이즈 10 °C

[0490] 다른 예에서, $T_{amb}=55^{\circ}C$ 를 가진 국가들에서 듀얼 H-브리지 제어기는 147 °C에서 펄싱을 멈추도록 구성될 수 있으며, 최대 델타 사이클링은 T_j - $T_{air} = 80^{\circ}C$ 이 된다. T_j 에 대한 절대적 USL은 150 °C이다. 이것은 아래에 나타낸 저하 범위를 제공한다:

[0491] $137^{\circ}C \leq T_j < 147^{\circ}C$, 사이즈 10 °C, 또는

[0492] $70^{\circ}C \leq T_j - T_{air} < 80^{\circ}C$, 사이즈 10 °C

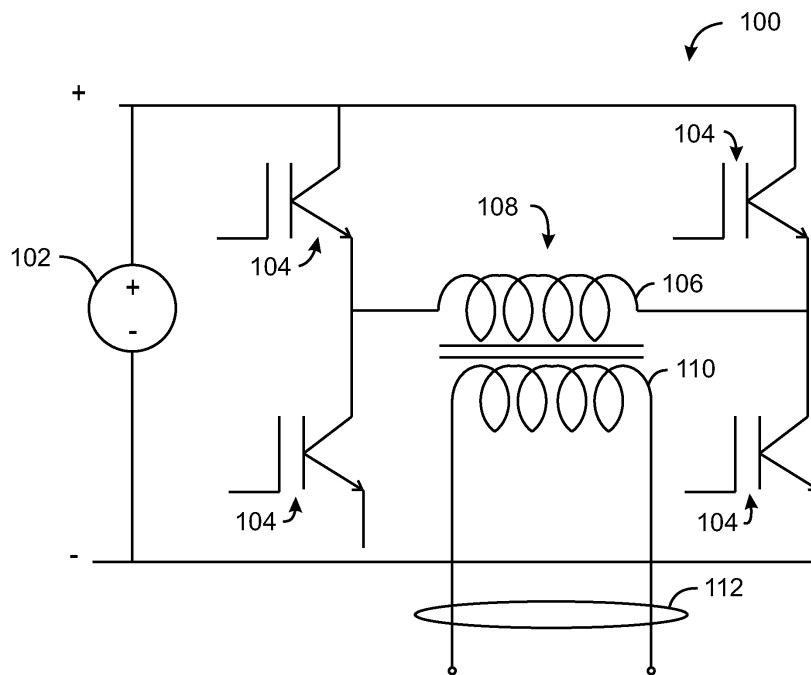
[0493] 본 기술들의 실시예들은 이하에서 도 23 및 24를 참조하여 더욱 용이하게 이해될 수 있다.

[0494] 도 23은 실시예들에 따라, 부하 전류를 저하시키는데 사용되는 제어 루프의 블록도이다. 제어 루프는 시스템 제어기에서 구현될 수 있다. 도 23에 도시된 바와 같이, 부하 전류(또는 전력)는 시스템 제어기에서 듀얼 H-브리지 제어기(ALC)로 전송되는 I_{batt} 명령(2300)을 감소시키는 것에 의해 저하될 수 있다. 응용과 관계없이, 듀얼 H-브리지의 보호적 턴-오프를 트리거하는 $T_j=147^{\circ}C$ 에 도달하기 이전에, I_{batt} 를 저하시키는 것을 개시하는 레벨로부터, 상기 명시된 레벨들 이내에서 T_j 를 제어하도록 시도하는 10 도의 범위가 존재한다. 일 실시예에서, I_{batt} 명령은 $T_j > 137^{\circ}C$ 동안 저하될 것이다. 예를 들어, $T_j < 137^{\circ}C$ 에서는, 어떠한 저하도 일어나지 않으며, 새로운 I_{batt} 명령(2300)은 본래의 I_{batt} 명령(2302)이 된다. $T_j=137 + \delta T^{\circ}C$ 에서, 새로운 I_{batt} 명령(2300)은 본래의 I_{batt} 명령(2302)의 $1 - (\delta T/12)$ 배가 된다. 147 °C보다 약간 작은 T_j 에서, 새로운 I_{batt} 명령(2300)은 본래의 I_{batt} 명령(2302)의 $1 - (\delta T/12)$ 배가 된다(본래의 I_{batt} 명령(2302)의 16.7%). 또한, 제어 루프가 본래의 I_{batt} 명령의 16.7%인 최소 I_{batt} 를 가지기 때문에, 듀얼 H-브리지 제어기(ALC)는 위상 A 또는 위상 B에서 $T_j \geq 147^{\circ}C$ 인 경우 듀얼 H-브리지의 동작을 스위치 오프할 수 있다. 저하를 결정하기 위한 제어 파라미터로서 T_j 를 사용하는 것은 터널 주행 동안의 서멀 사이클링 또는 주변 공기 온도가 정상보다 매우 높은 다른 시나리오에 대한 적절한 보호를 제공할 수 있다.

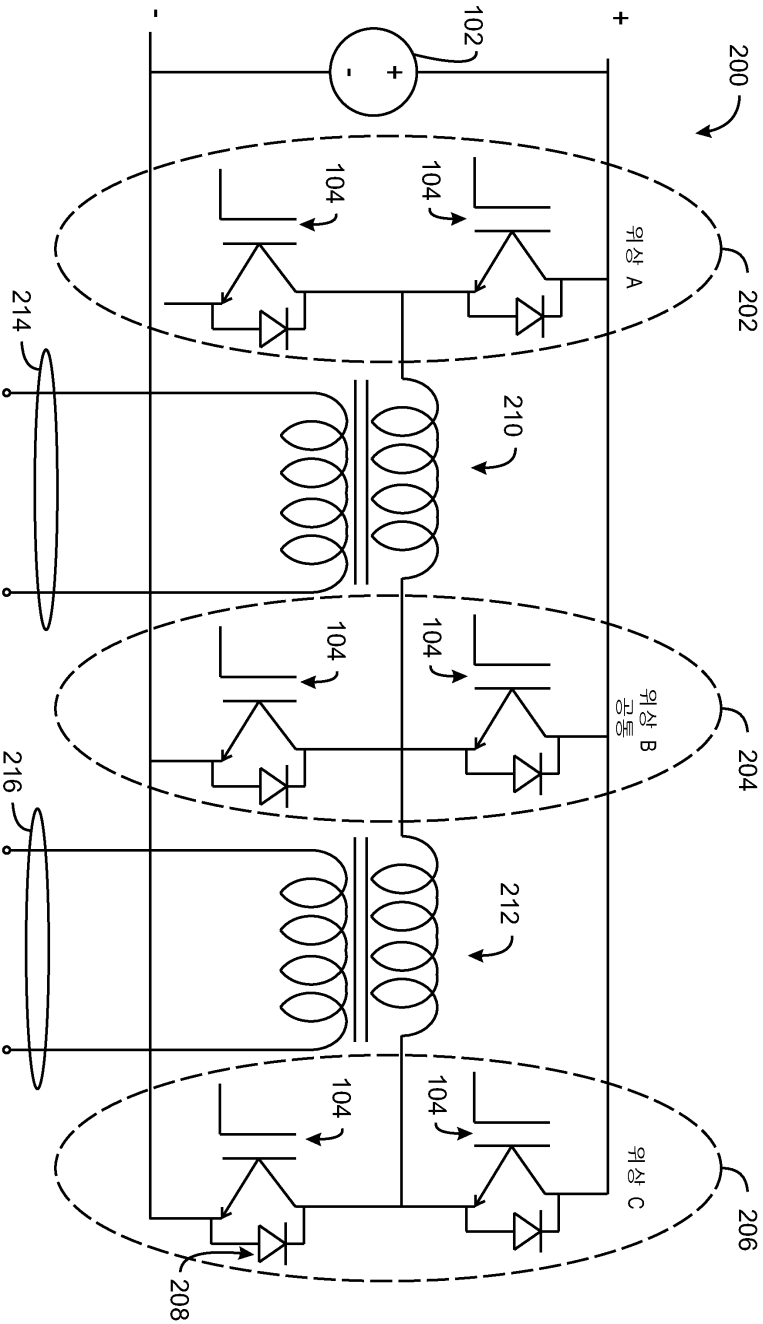
- [0495] 도 24는 실시예들에 따라, 부하 전류를 저하시키는데 사용되는 제어 루프의 블록도이다. 제어 루프는 시스템 제어기에서 구현될 수 있다. 도 23에 도시된 바와 같이, 부하 전류(또는 전력)은 시스템 제어기에서 듀얼 H-브리지 제어기(ALC)로 전송되는 Ibatt 명령(2300)을 감소시키는 것에 의해 저하될 수 있다. 도 24의 제어 루프에서, 저하를 결정하는 제어 파라미터는 Tj 단독이 아닌 Tj-Tair이다. Tj-Tair의 사용은 예를 들어 냉각 시스템 고장 또는 핀 차단 등으로 인하여 냉각 유닛이 유효하게 동작하지 않는 경우들에 있어서 서멀 사이클링에 대한 적절한 보호를 제공할 수 있다. 도 24에 나타난 제어 루프의 실시예에서, Ibatt 명령은 Tj-Tair > 76℃ 동안 저하된다. 예를 들어, Tj-Tair < 76℃에서는, 어떠한 저하도 수행되지 않으며, 새로운 Ibatt 명령(2300)은 본래의 Ibatt 명령(2302)이 된다. 86℃보다 약간 작은 Tj-Tair에서, 새로운 Ibatt 명령(2300)은 본래의 Ibatt 명령의 1-(10/12) 배로 저하된다(본래의 Ibatt 명령의 16.7%). 또한, 제어 루프는 본래의 Ibatt 명령의 16.7%인 최소 Ibatt를 갖기 때문에, 듀얼 H-브리지 제어기(ALC)는 위상 B 또는 C에서 Tj-Tair > 86℃ 인 경우에 듀얼 H-브리지의 동작을 스위치 오프할 수 있다.
- [0496] 도 25는 본 발명의 예시적 실시예에 따른 듀얼 H-브리지를 사용할 수 있는 디젤-전기 기관차의 블록도이다. 단순화된 부분 단면도로 나타나 있는 상기 기관차는 일반적으로 참조부호 2500으로 지칭된다. 도 25에 보이지 않는, 다수의 트랙션 모터들은 구동 휠들(2502)의 뒤에 위치해 있으며, 축들(2504)에 대해 구동 관계로 커플링되어 있다. 도 25에 보이지 않는, 다수의 보조 모터들은 기관차의 여러 장소에 위치해 있으며, 송풍기 또는 라디에이터 팬과 같은 보조 부하들과 커플링되어 있다. 모터들은 교류(AC) 전기 모터일 수 있다. 기관차(2500)는 모터들에 대한 전력을 제어하는, 전술한 듀얼 H-브리지 컨버터들과 같은 다수의 전기 인버터 회로들을 포함할 수 있다. 전력 회로들은 장비 수납함(2506)에 적어도 부분적으로 위치해 있다. 인버터들(208)과 필드 제어(field control)(204)에 관한 제어 전자장치 및 다른 전자 부품들이 장비 수납함(2506)의 랙들에 수납된 회로 보드들에 배치될 수 있다. 제어 회로들은 전술한 듀얼 H-브리지 제어기(ALC) 및 시스템 제어기를 포함할 수 있다. 장비 수납함(2506) 내에는, 전력 변환에 사용되는 고 전력 IGBT 반도체 디바이스들이 공기-냉각형 히트싱크들(2508)에 실장될 수 있다.
- [0497] 상기 설명은 제한적이지 않고 예시적이도록 의도되는 것을 알아야 한다. 예를 들어, 상기 실시예(및/또는 그 양태)는 상호 조합하여 사용될 수 있다. 또한, 특정 상황 또는 재료를 각종 실시예의 교시에 대해 그 범위를 벗어남이 없이 적응시키기 위해 여러가지 수정이 이루어질 수 있다. 본 명세서에 기재된 재료의 치수 및 형태는 각종 실시예의 파라미터를 한정하도록 의도되지만, 이들 실시예는 결코 제한적이지 않으며 예시적 실시예이다. 여러가지 다른 실시예는 상기 설명을 숙독하고 나면 명백해질 수 있다. 따라서, 각종 실시예의 범위는 청구범위뿐 아니라 이러한 청구범위에 의해 권한 부여되는 균등물의 전체 범위를 참조하여 결정되어야 한다.
- [0498] 첨부된 청구범위에서, 용어 "구비하는"과 "여기서"는 각각의 용어 "포함하는"과 "여기에서"의 평이한 등가물로서 사용된다. 더욱이, 하기 청구범위에서, "제 1", "제 2", "제 3", "상부", "하부", "하단", "상단", "위", "아래" 등의 용어는 단지 라벨로서 사용되며, 그 대상에 수치적 또는 위치적 요건을 부과하도록 의도되지 않는다. 추가로, 하기 청구범위의 한정은 수단-플러스-기능(means-plus-function) 형태로 작성되지 않으며, 이러한 청구범위 한정성이 "means for"에 뒤이어 추가 구조가 없는 기능 설명이 이어지는 문구를 명확히 사용하지 않는 한 그리고 이 문구를 명확히 사용할 때까지는 35 U.S.C. § 112, 제 6 단락에 기초하여 해석되도록 의도되지 않는다.
- [0499] 여기에서 사용되는, 단수형으로 인용되고 또한 단어 "하나" 또는 "한"으로 시작되는 요소 또는 스텝은, 배제가 명시적으로 언급되지 않는 한, 복수의 상기 요소들 또는 스텝들을 배제하지 않는 것으로 이해되어야 한다. 또한, 본 발명의 "일 실시예"에 대한 참조는 인용된 특징들을 또한 포함하는 추가의 실시예들의 존재를 배제하는 것으로 해석되는 것을 의도하지 않는다. 또한, 명시적으로 반대로 언급되지 않는다면, 특정 특성을 가진 요소 또는 복수의 요소들을 "구성하는", "포함하는" 또는 "가지는" 실시예들은 그 특성을 갖지 않는 추가 요소들을 포함할 수 있다.
- [0500] 여기에 포함된 본 발명의 사상 및 범위를 이탈하지 않는 범위 내에서, 상기 제어 방법의 소정 변형들이 이루어질 수 있으므로, 상기 설명 또는 첨부 도면들에 나타난 모든 주제 내용은 단지 발명의 개념을 설명하기 위한 예시로서 해석되어야 하며 본 발명을 한정하는 것으로 해석되지 말아야 한다.

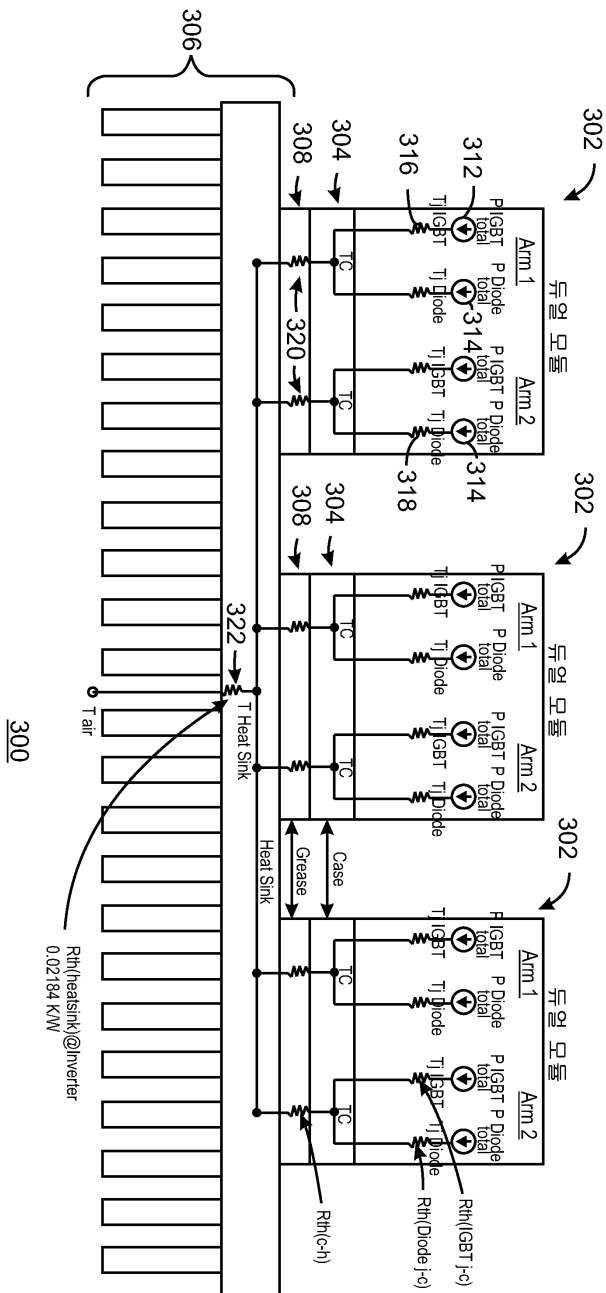
도면

도면1

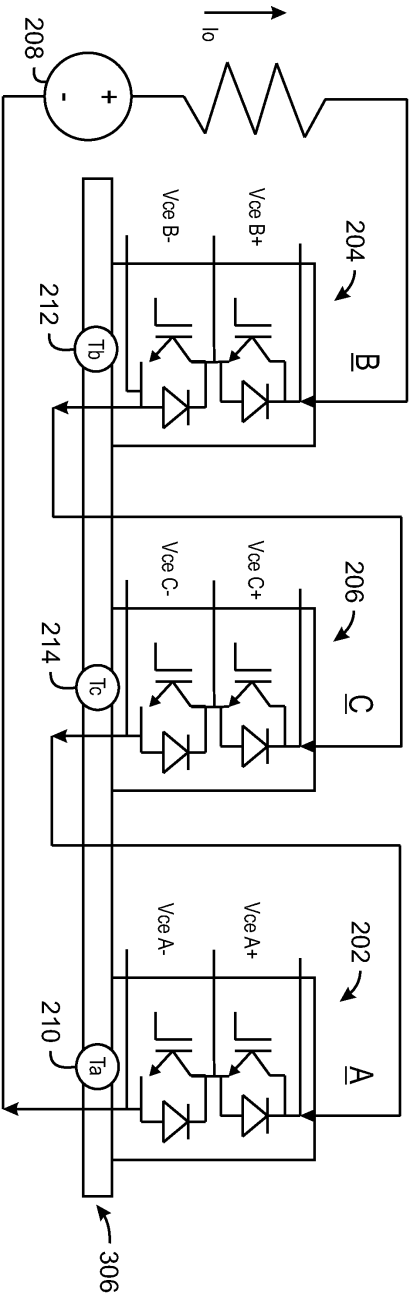


도면2

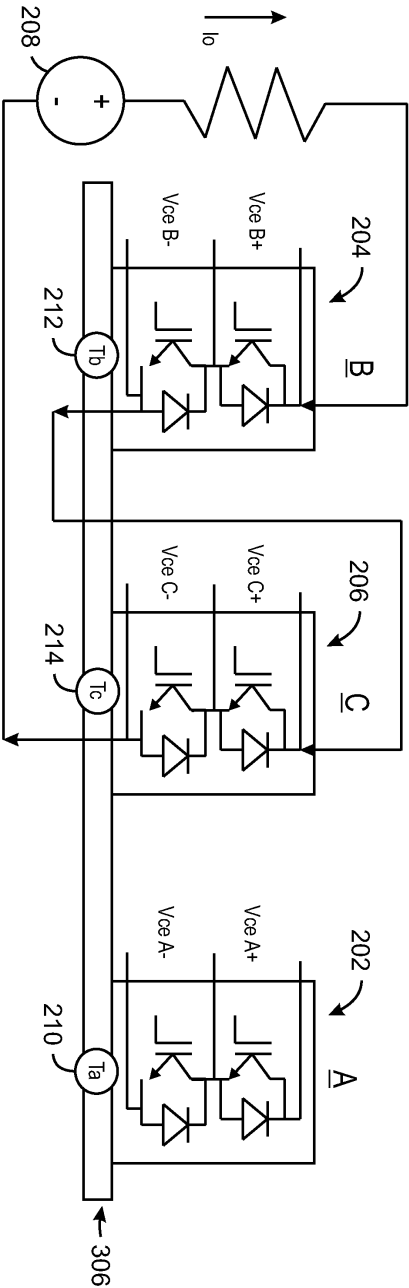




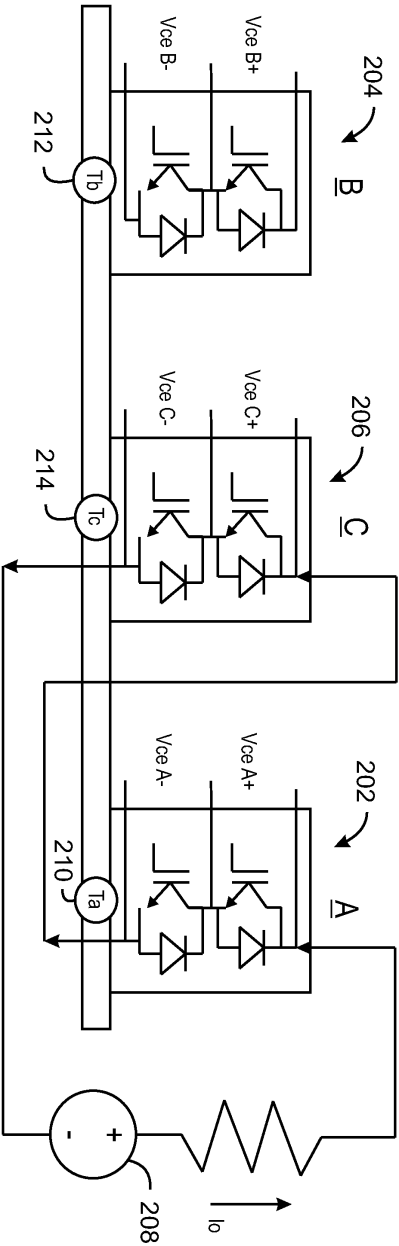
도면4a



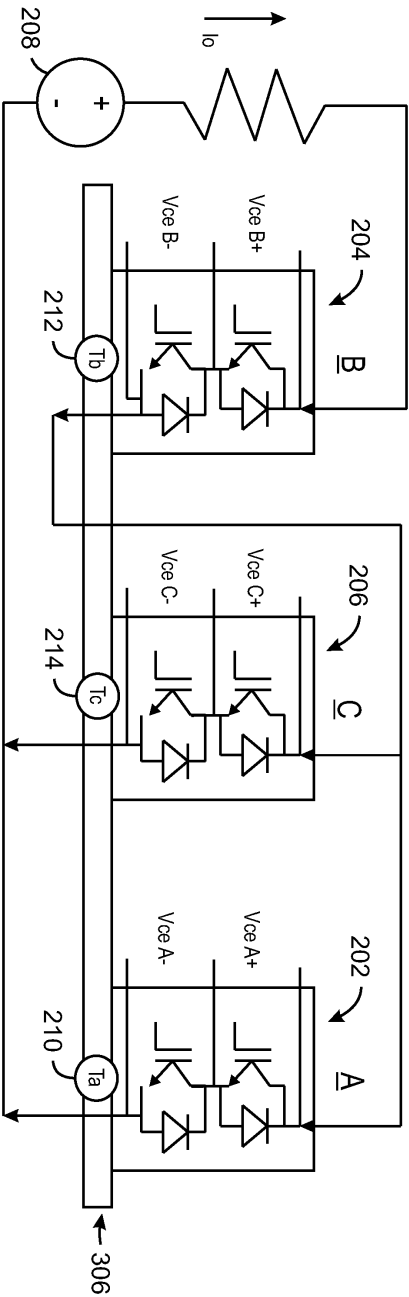
도면4b



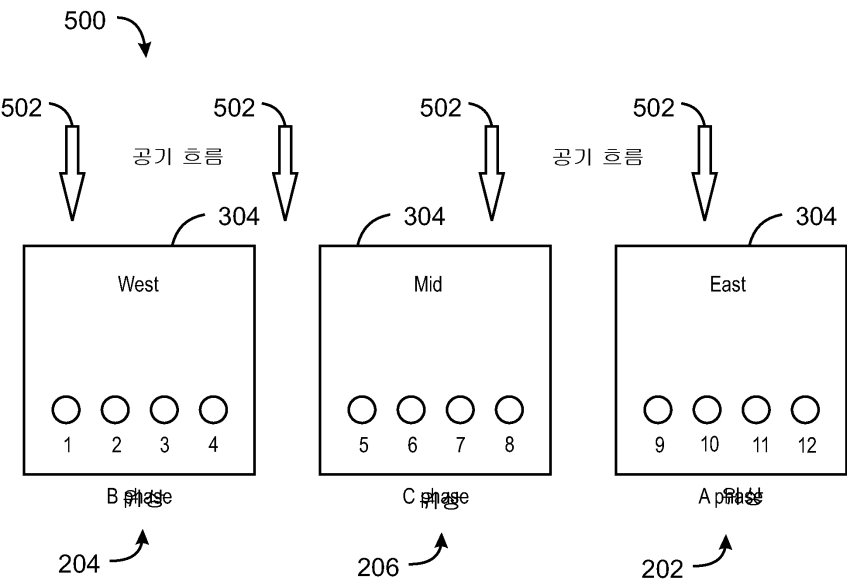
도면4c



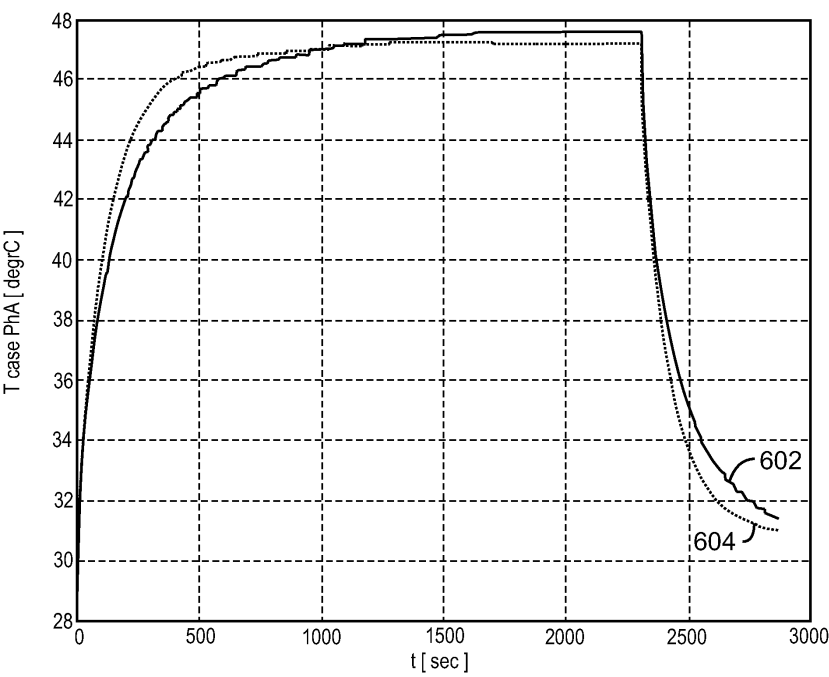
도면4d



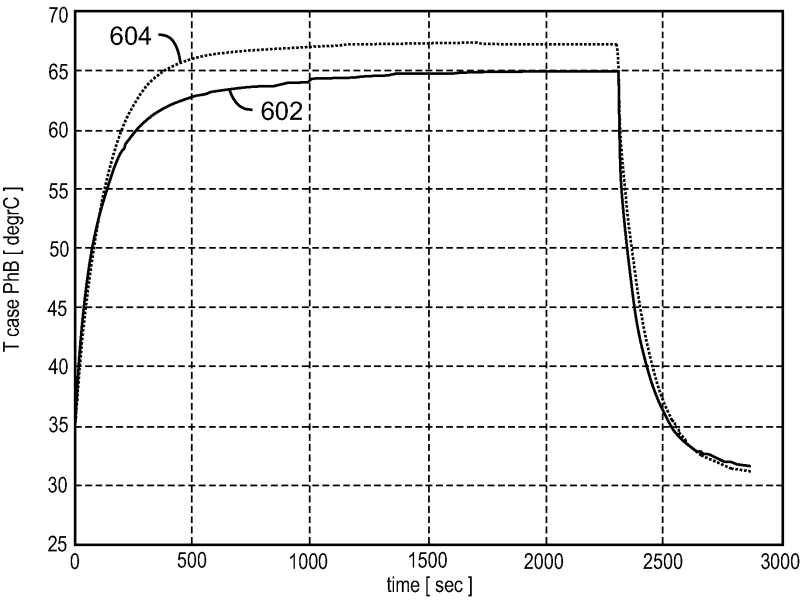
도면5



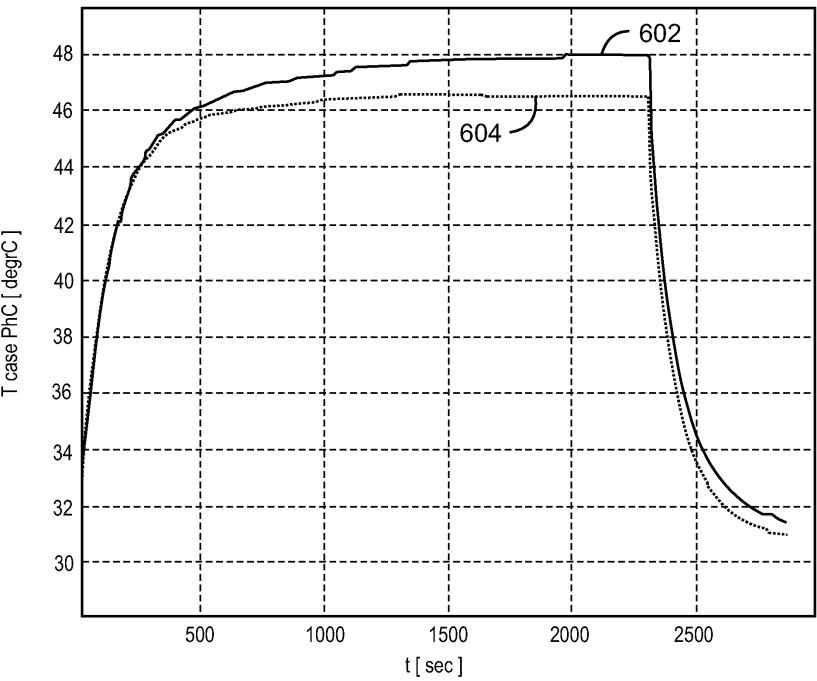
도면6a



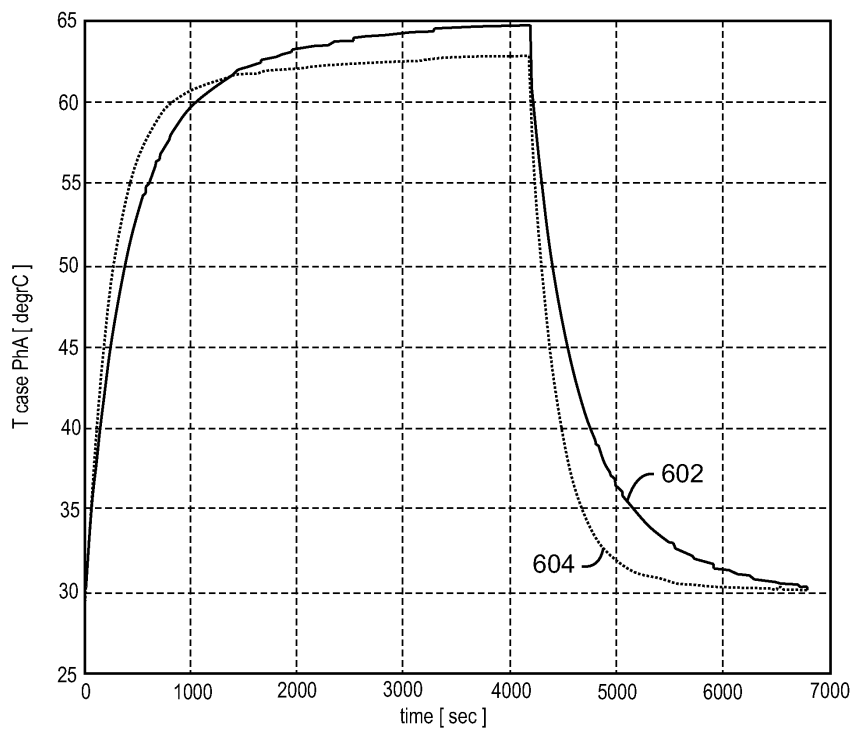
도면6b



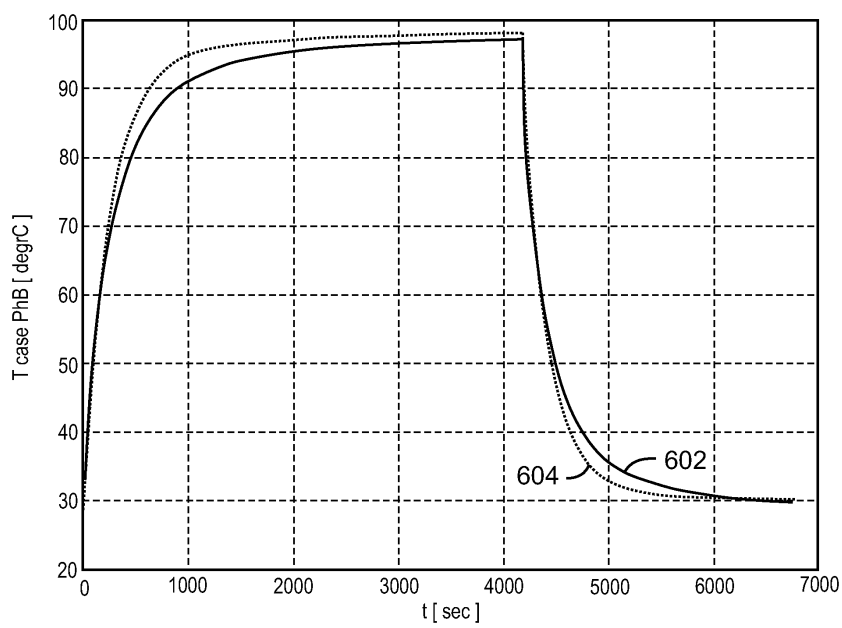
도면6c



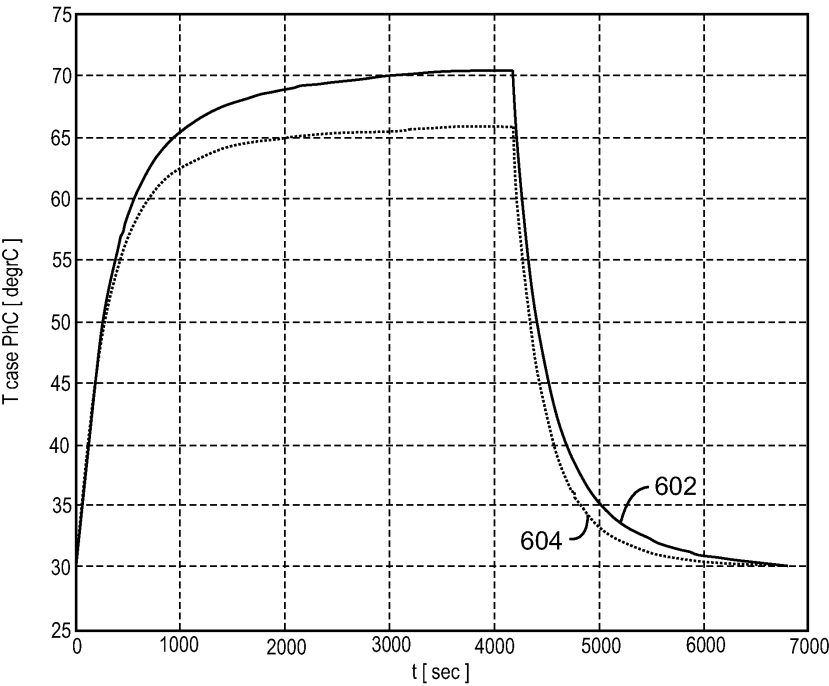
도면6d



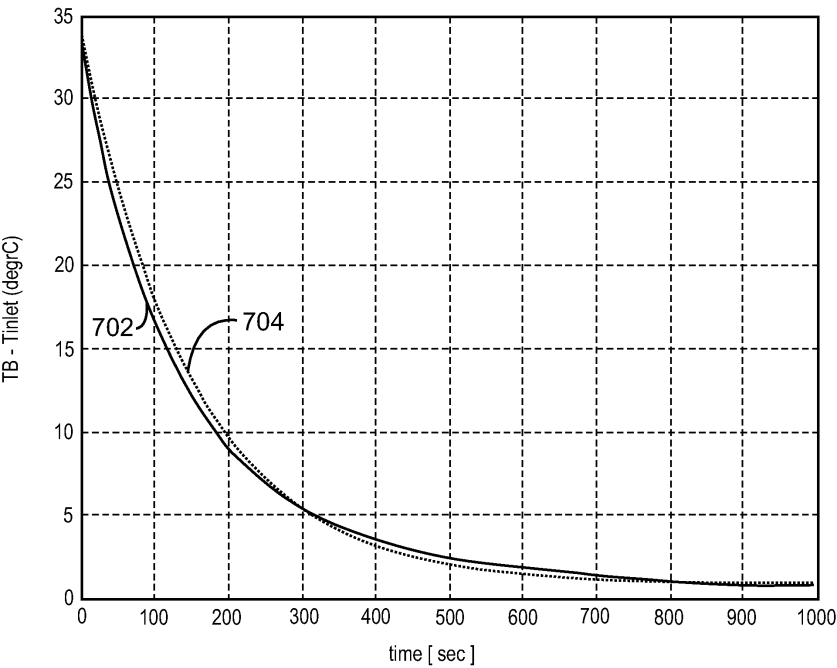
도면6e



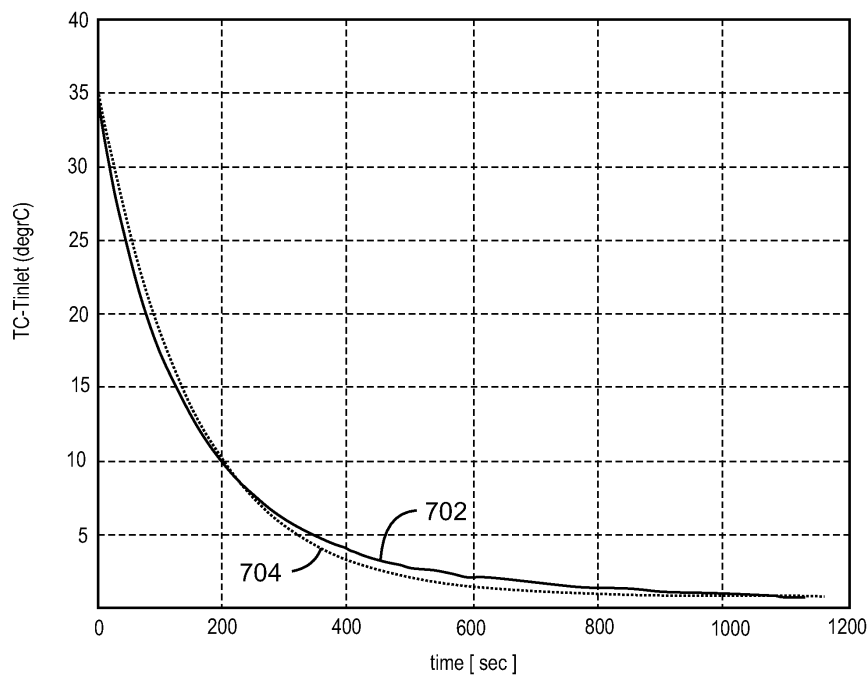
도면6f



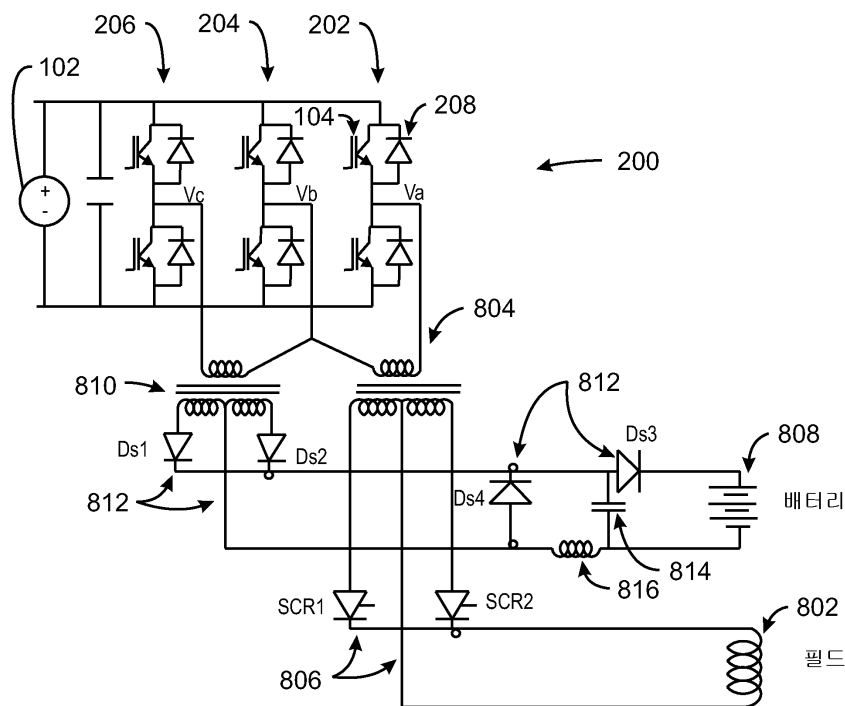
도면7a



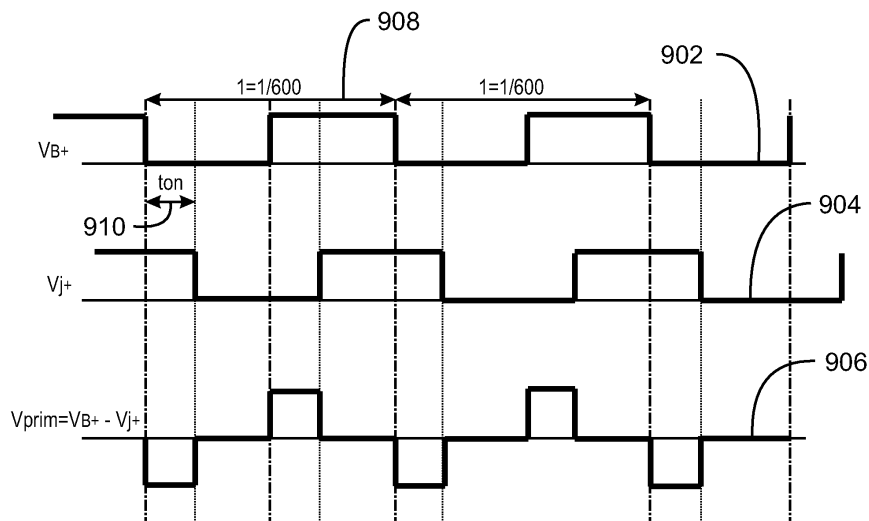
도면7b



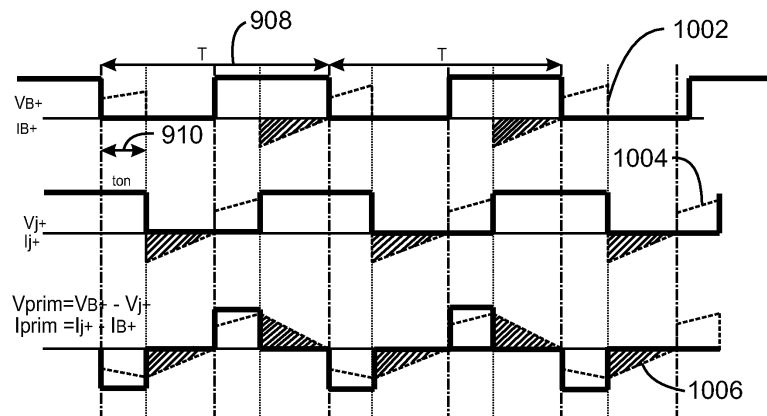
도면8



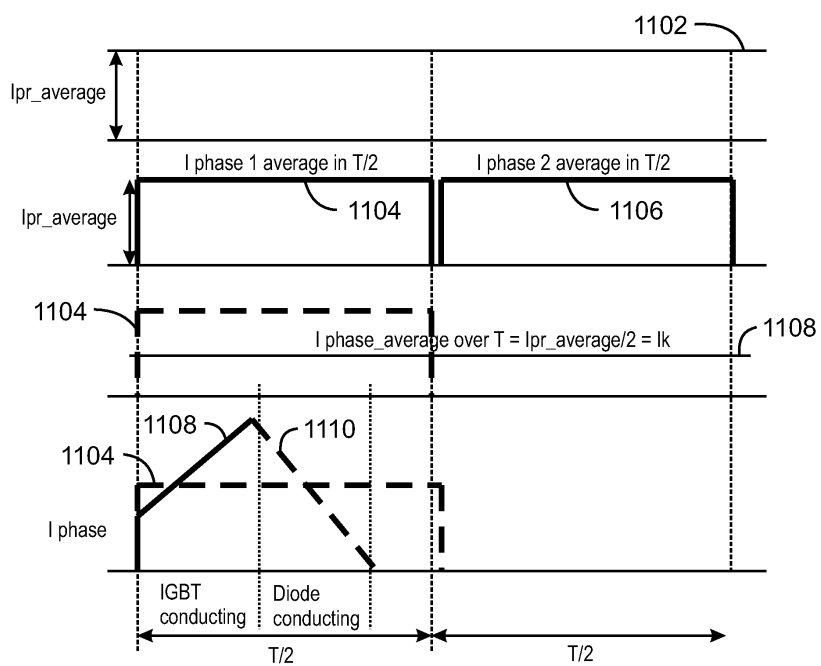
도면9



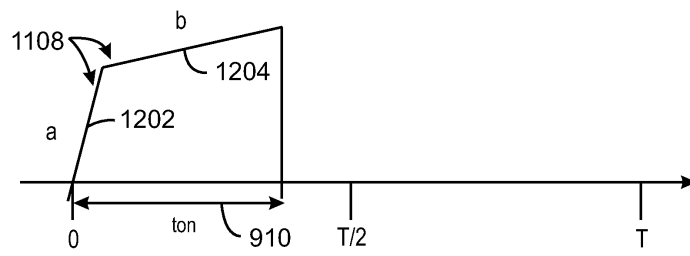
도면10



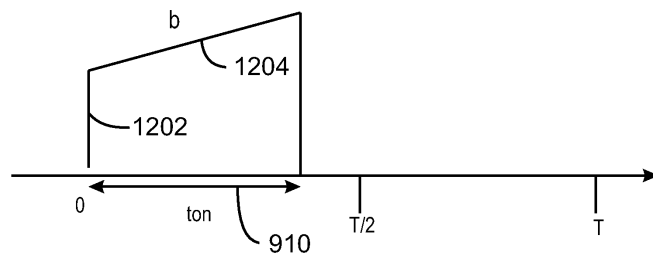
도면11



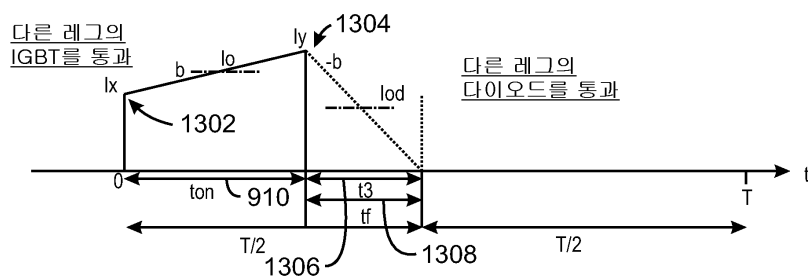
도면12a



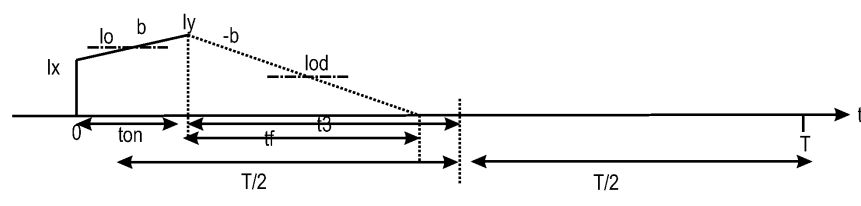
도면12b



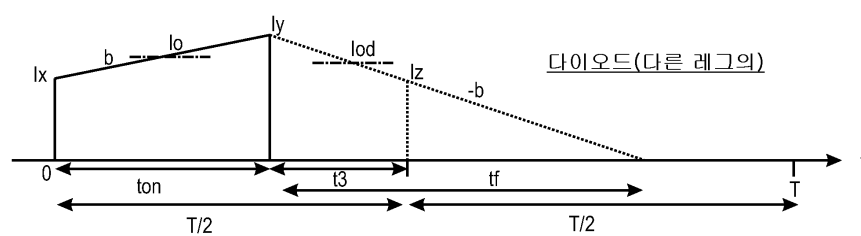
도면13a



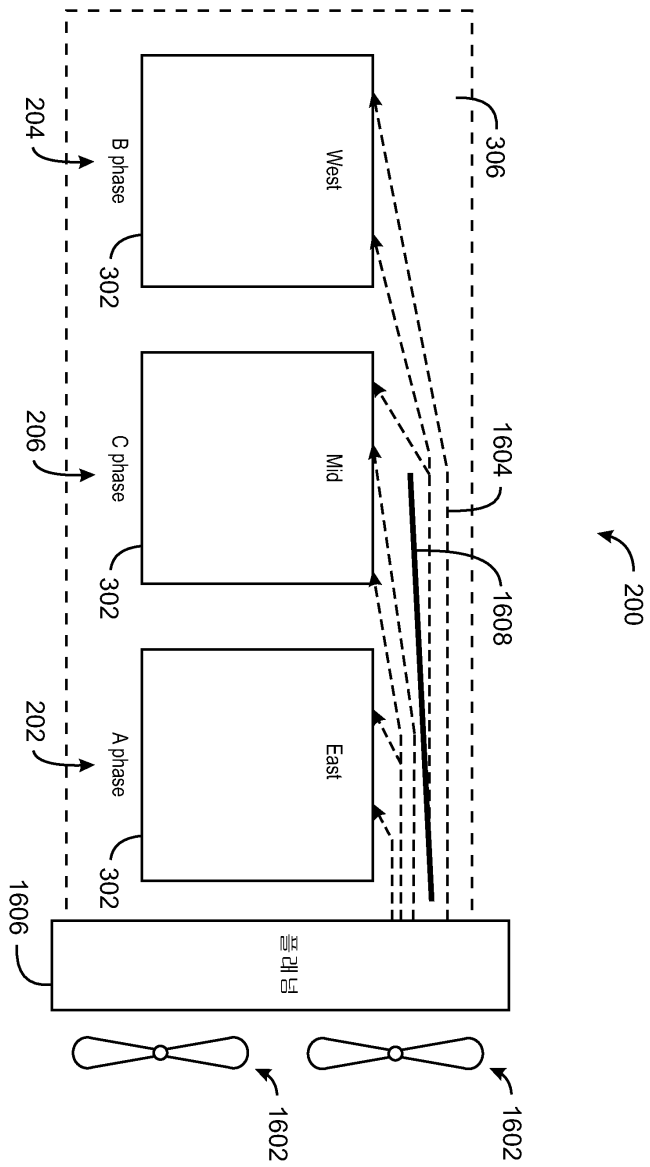
도면13b



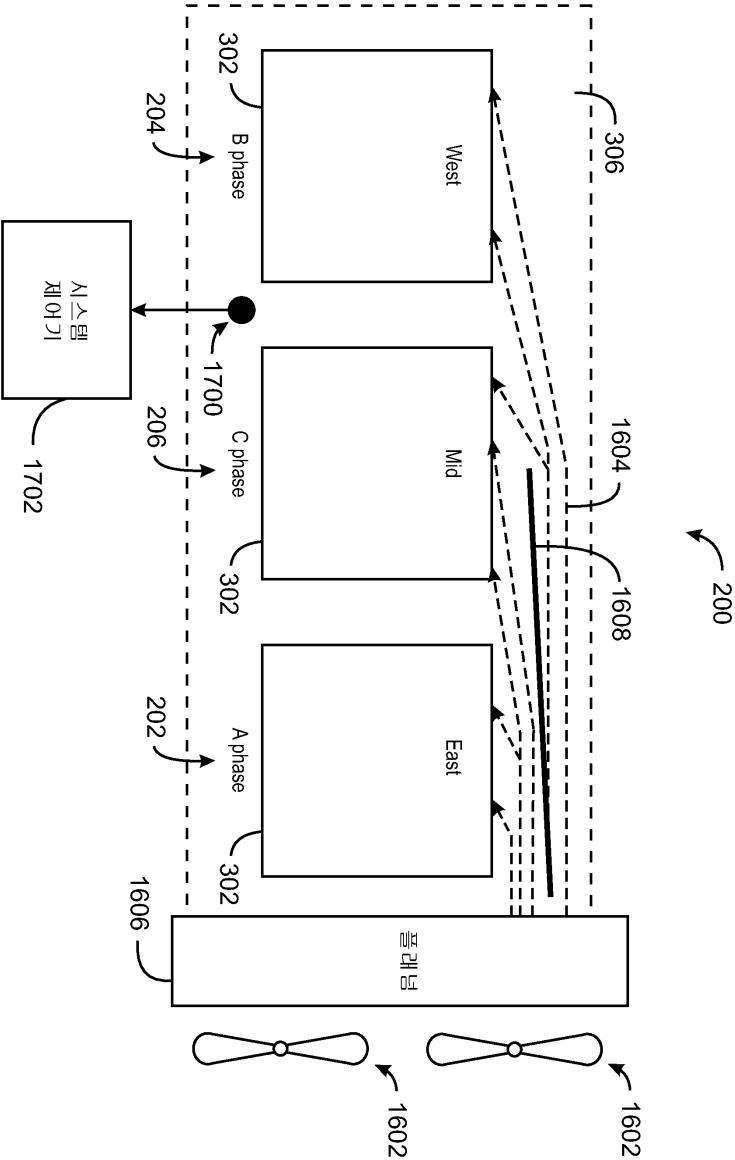
도면13c



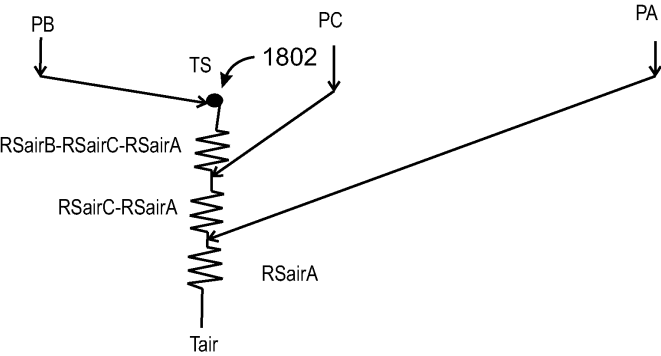
도면16



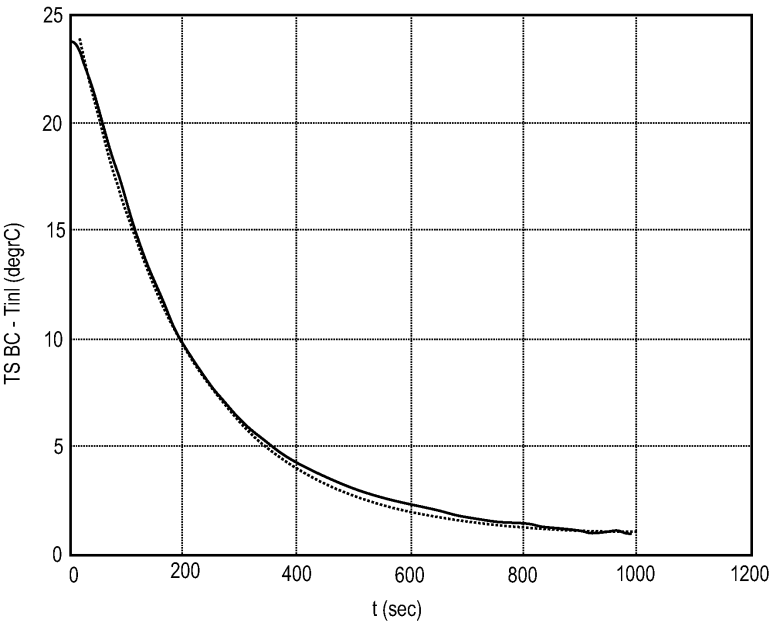
도면17



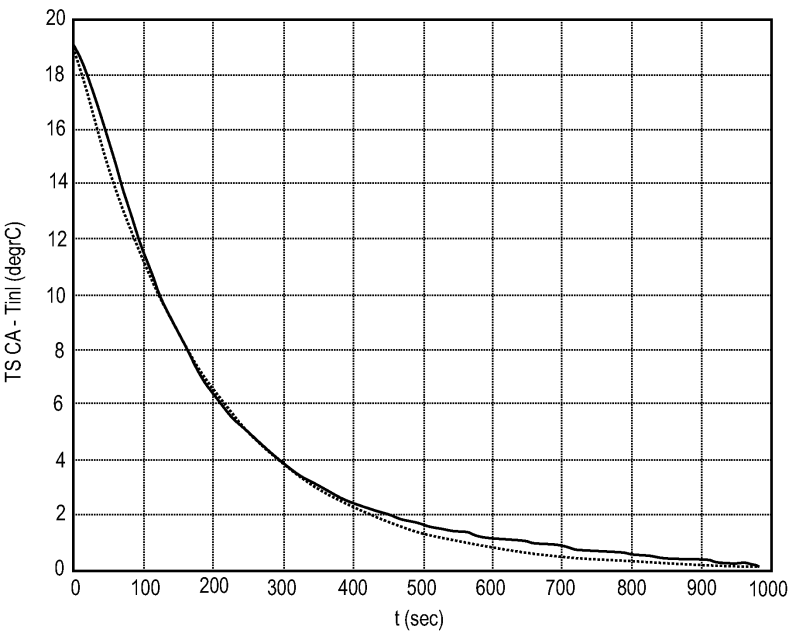
도면18



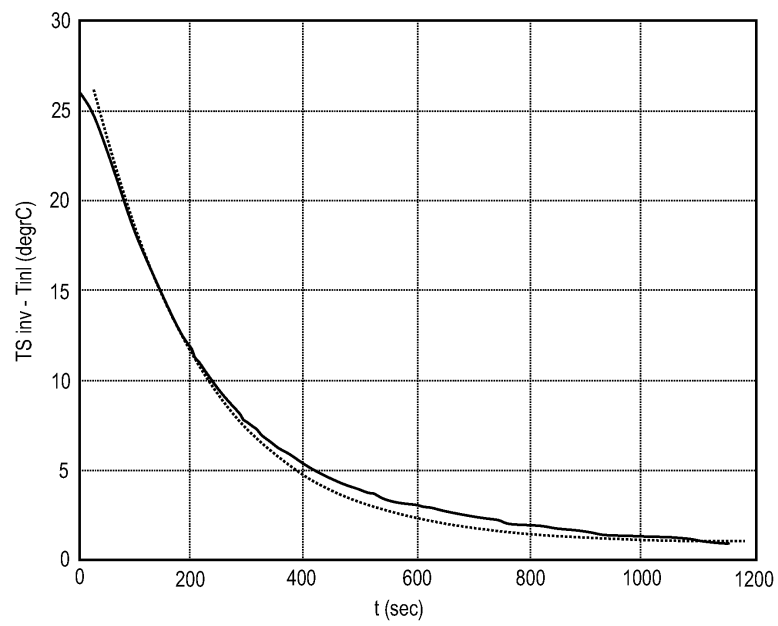
도면19a



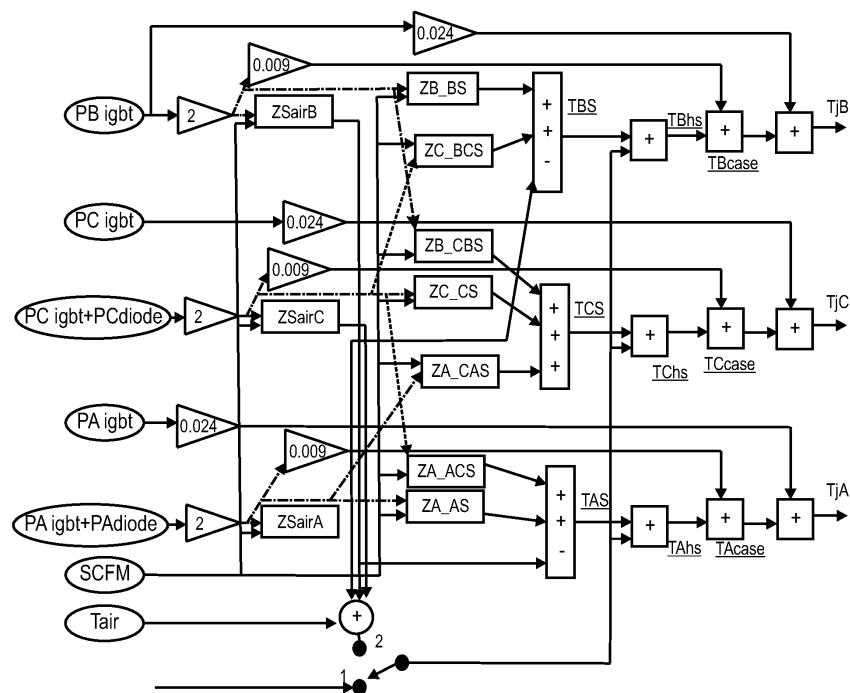
도면19b



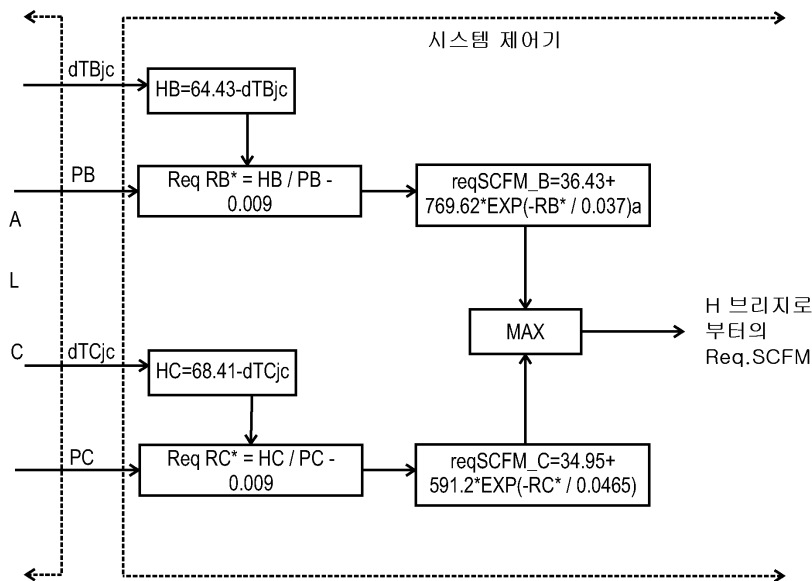
도면19c



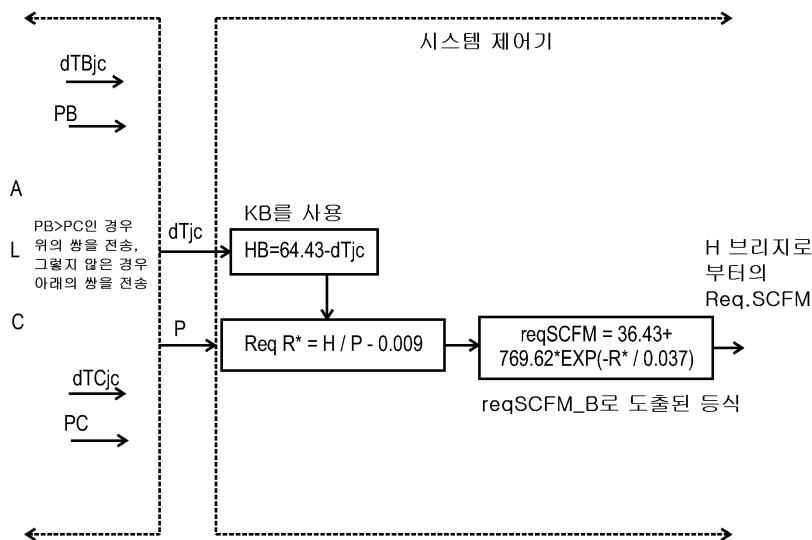
도면20



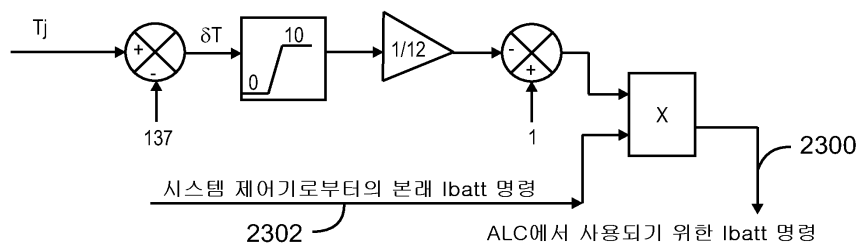
도면21



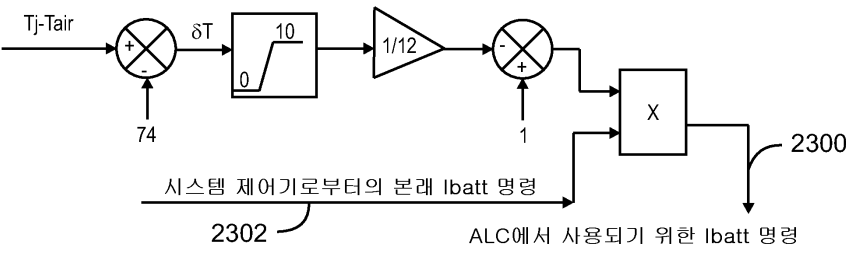
도면22



도면23



도면24



도면25

