

유도가열 밥솥용 싱글-엔디드 공진형 인버터의 부하상태 검출 방법

오용승*, 조규민**

Load State Detection Method of the Single-Ended Resonant Inverter for the Induction Heating Rice Cooker

Yong-Seung Oh*, Kyu-Min Cho**

요 약

유도가열용 고주파 공진 인버터의 경우 무부하 혹은 비정상 부하에서 인버터를 구동하게 되면 높은 공진 전압에 의해 스위칭 소자가 파손될 수 있다. 따라서 부하의 상태가 정상인지 혹은 무부하 또는 비정상인지를 인버터 기동 시에 판단하여야 한다. 또한 정상부하 상태에서 기동이 될지라도 동작 중에 부하가 제거되는 경우가 발생할 수 있다. 본 논문에서는 유도가열 밥솥용 싱글-엔디드 공진형 인버터의 새로운 부하상태 검출방법을 제안하며, 이는 기동 시의 부하상태 검출방법과 동작 중의 부하상태 검출방법으로 구분된다. 제안한 방법에 따르면, 기동 시에는 최악의 조건인 무부하 또는 비정상부하 상태에서도 공진 과전압에 의한 스위칭 소자의 파손이 일어나지 않는 테스트 스위칭 펄스로 인버터를 구동, 입력 전원전류와 공진전압의 크기로써 부하상태를 판단한다. 동작 중에는 입력전력의 지령치와 실제치의 오차 크기로써 부하상태를 판단한다. 1.3 kW 전기밥솥에 적용한 실험결과로써 제안하는 부하상태 검출방법의 유용성을 검증하였다.

Abstract

In the case of the high-frequency resonant inverter for induction heating, when the inverter is driven under no-load or abnormal load, the switching element may be damaged by the high resonance voltage. Therefore, the inverter should be judged whether the load is normal or not. Also, the load may be removed during operation even when the inverter is started under normal load. In this paper, we propose a new load state detection method of single-ended resonant inverter for the induction heating rice cooker which is divided into the load state detection method at startup and load state detection method during operation. According to the proposed method, the inverter is driven by a test switching pulse that does not cause the breakdown of the switching element due to resonance overvoltage even under abnormal load or no load, which is the worst condition. The load state during operation is determined by the magnitude of the error between command value and the actual value of the input power. The experimental results of the 1.3 kW induction heating rice cooker verify the usefulness of the proposed load state detection methods.

Keywords

single-ended, resonant, inverter, induction heating, rice cooker, load state detection,

* (주)윌링스 연구소장

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0003-1742-0442>

** 유한대학교 정보통신공학과 교수(교신저자)

- ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-7544-5862>

• Received: Jan. 30, 2020, Revised: May 02, 2020, Accepted: May 05, 2020

• Corresponding Author: Kyu-Min Cho

Dept. of Information and Communication Engineering, Yuhan University, Korea

Tel.: +82-2-2610-0845, Email: limsa@yuhan.ac.kr

1. 서 론

유도가열은 전자기 유도 현상을 이용하여 전기에너지를 열에너지로 변환하여 가열하는 방식으로 오래전부터 산업계에서 금속의 용융 및 열처리 가공 분야에 사용되었다[1]-[3]. 특히 1980년대 반도체 소자와 제어 시스템의 진보로 다양한 고주파 공진형 인버터 시스템이 개발됨으로써, 높은 효율과 친환경적 특성에 의해 오늘날 산업계뿐만 아니라 가정용 조리기에도 그 사용이 급증하고 있다[4][5].

전기밥솥 혹은 인덕션 레인지 등 가정에서 사용되는 유도가열 조리기용 인버터는 보통 1~2kW급 용량을 가지며, 구조가 간단하고 가격이 낮은 싱글-엔디드(Single-ended) 공진형 인버터가 주로 사용된다[6]-[8]. 싱글-엔디드 공진형 인버터는 워킹코일(Working coil)과 병렬로 커패시터를 삽입하여 전압 공진을 발생시키기 때문에 가정용의 경우 1.2kV 이상의 고 내압의 스위칭 소자가 사용된다[9][10].

유도가열 조리기용 인버터의 동작에서 전원 입력단 역할과 직류링크단의 전압 안정화를 위해서는 PFC(Power Factor Correction) 기능을 갖는 DC/DC 컨버터와 큰 용량의 직류링크 커패시터를 적용하는 것이 성능과 기술적 측면에서는 가장 바람직하다[11]. 그러나 싱글-엔디드 공진형 인버터는 회로의 단순화와 저가격의 측면에서 직류링크단에 쇼크 코일과 작은 용량의 커패시터만 적용, 인버터측의 고주파 스위칭에 의한 자연적인 고입력 역률 특성을 이용하는 방식을 적용함으로써 입력전압의 변화와 왜란에 대해 매우 취약하게 된다. 따라서 이를 해결하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[12][13].

한편, 싱글-엔디드 공진형 인버터를 사용하는 가정용 유도가열 조리기의 일반적인 제어는 초기 부하 상태를 파악하고 부하 상태가 정상이라고 판단되면 전력을 공급한다. 이 경우 전력제어의 방식은 고주파 공진 부하의 전력을 직접 제어하는 대신 계측이 용이한 입력전력을 통해 간접적으로 제어한다. 이 때 부하상태 판단이 잘못되어 무부하 혹은 비정상 부하 상태에서 전력을 공급하게 되면 공진전압이 매우 높아져 스위칭 소자가 소손될 수 있다. 동작 초기뿐만 아니라 동작 중에서 부하가 제거되는 경우에도 마찬가지다. 따라서 싱글-엔디드 공진형

인버터의 제어에서 부하 상태 검출은 필수적이며 이에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다[14].

일례로, 무부하 혹은 비정상 부하에서도 문제가 되지 않을 짧은 단펄스 신호로 스위칭 소자를 구동시킨 후, 발생하는 입력전류의 기울기 혹은 공진전압의 감쇄주기를 통해 초기 부하 상태를 검출하기도 하였다[15]. 그러나 이 방법은 입력전압의 순간적인 급변과 왜란에 대해 취약하여 부하의 상태 판단에 오류를 발생시킬 수 있다는 문제점이 있다.

본 논문에서는 일정 시간 동안 스위칭 소자를 구동하여 발생하는 입력전류 및 스위칭 소자 양단의 전압을 검출함으로써 초기 부하상태를 검출하는 방법을 제안하였다. 또한 입력전력 제어 오차의 크기와 지속시간을 이용하여 동작 중의 부하상태를 검출하는 방법을 제안하였다[16]. 제안하는 부하 상태 검출 방법을 가정용 1.3kW 유도가열 전기밥솥의 싱글-엔디드 공진형 인버터에 적용한 실험결과로써 187V, 220V, 253V 입력전압에서 왜란 및 동작 중 무부하 급변 시에도 신뢰성 있게 부하상태 검출이 가능함을 입증하였다.

II. 유도가열 조리기용 싱글-엔디드 공진형 인버터

2.1 모드별 회로 동작

유도가열 조리기용 싱글-엔디드 공진형 인버터의 회로구성을 그림 1에 나타내었다.

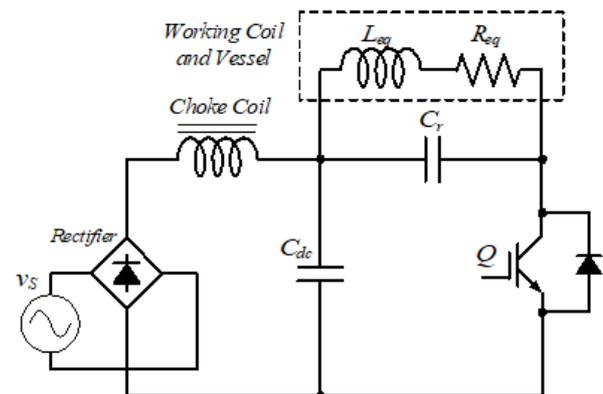


그림 1. 유도가열 조리용 싱글-엔디드 공진형 인버터의 회로도

Fig. 1. A Circuit diagram of the single-ended resonant inverter for induction cooker

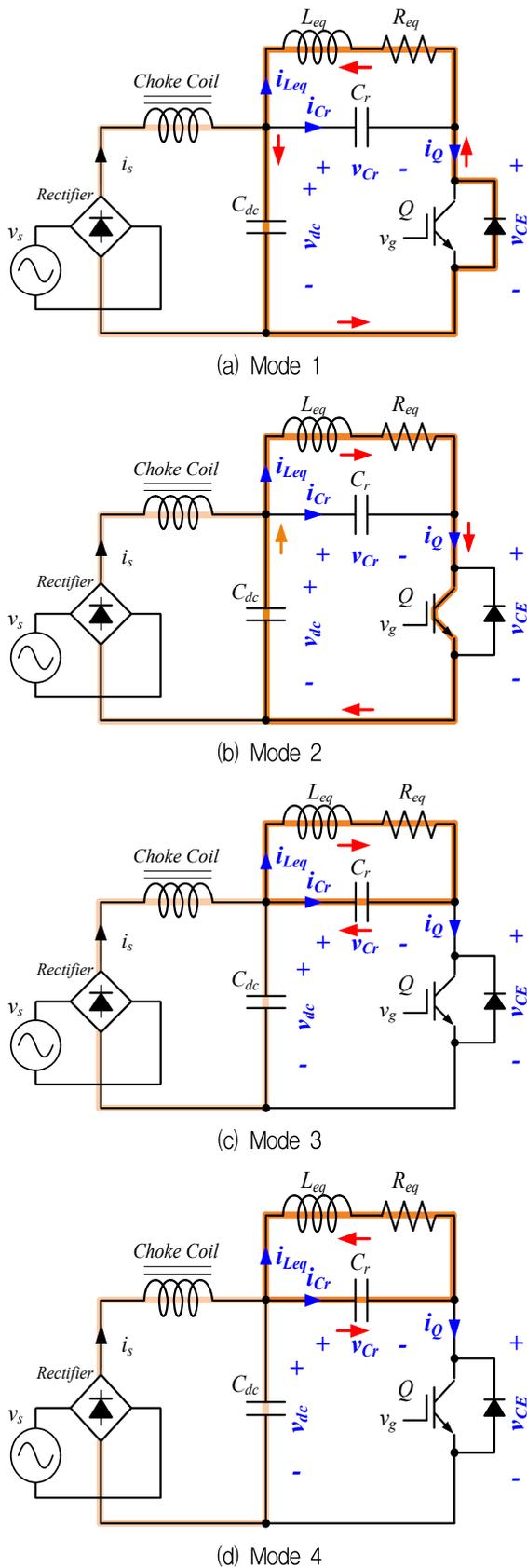


그림 2. 싱글-엔디드 공진형 인버터 모드별 동작
 Fig. 2. Mode of single-ended resonant inverter

정류를 위한 브리지 다이오드, 초크 코일과 입력 커패시터 C_{dc} 로 구성된 저역 통과필터, 워킹코일 L_{eq} 과 등가부하(조리용기)에 해당하는 R_{eq} 및 공진 커패시터 C_r 과 스위칭 소자 Q 로 이루어진 회로구성으로 매우 단순한 구조이므로 제조단가가 낮고 고장 개소가 작다는 장점이 있다. 싱글-엔디드 공진형 인버터의 동작은 그림 2에 나타난 바와 같이 4 가지 모드로 구분된다. 모드 1은 이전 모드의 공진 전류가 스위칭 소자 Q 의 역병렬 다이오드를 통해서 흐르는 상태이다. 따라서 스위칭 소자 Q 의 양단전압은 영전압이 되고, 이 구간에서 스위칭 소자를 턴 온 시키게 되면 자연스럽게 영전압 스위칭이 이루어진다.

모드 2는 스위칭 소자 Q 가 턴 온 되어 등가인덕터 L_{eq} 과 등가 저항 R_{eq} 를 통해 전류가 흐르는 상태로 입력으로부터 전력을 공급받는 모드이다.

모드 3에서는 스위칭 소자 Q 가 턴 오프 되고 등가인덕터 L_{eq} 과 공진 커패시터 C_r 간의 공진이 시작된다. 이 경우, IGBT의 꼬리전류(Tail current)를 무시하면 영전압 스위칭으로 고려된다.

모드 4는 등가인덕터 L_{eq} 의 에너지가 공진 커패시터 C_r 로 모두 축적되었다가 다시 역으로 등가인덕터 L_{eq} 로 에너지가 전달되는 모드이다.

각 모드별 회로의 이론적인 전압, 전류 파형을 그림 3에 나타내었다.

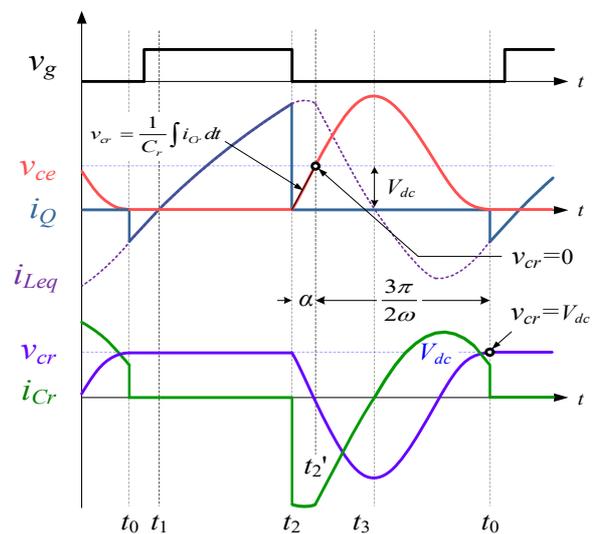


그림 3. 싱글-엔디드 공진형 인버터의 이론적 파형
 Fig. 3. Theoretical waveforms of the single-ended resonant inverter

2.2 등가회로 해석

부하에 전류가 흐르는 상태에 대한 등가회로는 스위칭 소자 Q 의 동작 상태에 따라 그림 4에 나타낸 바와 같이 온 구간과 오프 구간으로 구분 된다. 스위칭 소자 Q 가 온 되면 등가인덕터 L_{eq} 와 등가저항 R_{eq} 를 통해 전류가 흐르게 되고 스위칭 소자 Q 가 오프 되면 인덕터에 축적된 에너지가 커패시터로 전달되면서 공진을 이루게 된다.

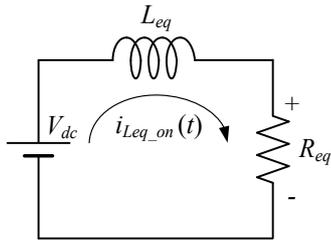
먼저, 스위칭 주기 동안 직류링크 전압 V_{dc} 가 일정하다고 가정하면, 스위칭 소자 Q 온 시의 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{dc} = L_{eq} \frac{di_{L_{eq_on}}(t)}{dt} + R_{eq} i_{L_{eq_on}}(t) \quad (1)$$

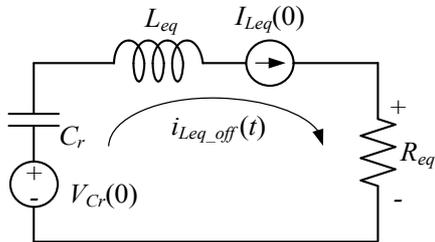
따라서 스위칭 소자 Q 온 시의 전류는

$$i_{L_{eq_on}}(t) = \frac{V_{dc}}{R_{eq}} \left(1 - e^{-\frac{R_{eq}}{L_{eq}} t} \right) \quad (2)$$

가 된다.



(a) 스위칭 소자 Q 온 구간
(a) On duration of switching element Q



(b) 스위칭 소자 Q 오프 구간
(a) Off duration of switching element Q
그림 4. 스위칭 소자 Q 상태에 따른 등가 회로
Fig. 4. Equivalent circuit according to the state of switching device Q

다음, 스위칭 소자 Q 오프 시 등가인덕터 L_{eq} 전류의 초기 값 $I_{L_{eq}}(0)$ 는 스위칭 소자가 오프 되는 순간의 전류로 스위칭 주기 동안의 최대 전류인 $I_{L_{eq}P}$ 가 되며, 공진 커패시터의 초기 값 $V_{Cr}(0)$ 는 V_{dc} 가 되므로 이들 초기치를 고려한 전압 방정식은 다음과 같다.

$$V_{dc} = \frac{1}{C_r} \int i_{L_{eq_off}} dt + L_{eq} \frac{d}{dt} (i_{L_{eq_off}} - I_{L_{eq}P}) + R_{eq} i_{L_{eq_off}} \quad (3)$$

식 (3)으로부터 스위칭 소자 Q 오프 시의 전류 $i_{L_{eq_off}}$ 를 구하면 다음과 같다.

$$i_{L_{eq_off}}(t) = A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \theta) \quad (4)$$

여기서,

$$A = \sqrt{\left(\frac{V_{dc}}{\omega L_{eq}} - \frac{\alpha I_{L_{eq}P}}{\omega} \right)^2 + I_{L_{eq}P}^2} \quad (5)$$

$$\alpha = \frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \quad (6)$$

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{L_{eq}C_r} - \left(\frac{R_{eq}}{2L_{eq}} \right)^2} \quad (7)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{\alpha L_{eq} I_{L_{eq}P} - V_{dc}}{\omega L_{eq} I_{L_{eq}P}} \right) \quad (8)$$

이다.

한편, 스위칭 소자 Q 가 오프 되면 등가인덕터 L_{eq} 와 공진 커패시터 C_r 의 공진이 시작되므로 공진 커패시터에 흐르는 전류 i_{C_r} 은 다음과 같다.

$$i_{C_r_off}(t) = -A e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \theta) \quad (9)$$

따라서 공진 커패시터의 전압 v_{C_r} 은

$$v_{C_r}(t) = -\frac{A}{C_r} \int e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \theta) dt \quad (10)$$

가 된다. 이 때, 공진전압이 최대가 되는 시점은 공

진주기 T 의 1/4인 때가 되므로 공진전압의 최대치 $V_{C,P}$ 는 다음과 같다.

$$V_{C,P} = -\frac{A}{C_r} \frac{1}{(\alpha + \omega)^2} \left(\alpha + \omega e^{-\frac{\alpha\pi}{2\omega}} \right) \quad (11)$$

한편, 스위칭 소자 양단 전압 $v_{CE}(t)$ 는 직류링크 단 전압 V_{dc} 와 공진 커패시터 전압 $v_{C_r}(t)$ 의 합이 되므로 전원 전압 V_S 전체 주기에 걸쳐 스위칭 소자 양단에 나타나는 최대치 V_{CEP} 는 다음과 같다.

$$V_{CEP} = V_{SP} - V_{C,P} \quad (12)$$

여기서, V_{SP} 는 전원전압의 최대치이며 식 (10)에 나타낸 바와 같이 $V_{C,P}$ 는 음의 크기를 갖기 때문에 스위칭 소자 Q 에 걸리는 최대전압 V_{CEP} 는 1000V 이상의 고압이 된다.

III. 부하상태 검출방법

3.1 기존의 부하상태 검출방법

고주파 공진형 인버터의 전력제어는 고주파인 부하측의 유효 전력을 순시적으로 계측하기는 용이하지 않으므로 통상 입력전력 제어를 통해 부하의 전력을 간접적으로 제어한다. 이 때, 부하의 상태가 무부하 혹은 비정상 부하일 때 인버터를 기동하게 되면 입력전력이 작은 상태에서도 공진전압이 스위칭 소자의 내압 이상으로 상승, 스위칭 소자가 파손되기 때문에 인버터 기동전에 필히 부하 상태를 검출해야 한다. 종래의 경우, 짧은 시간의 단 펄스 신호로 스위칭 소자를 동작시키고 발생하는 입력전류의 기울기 혹은 공진 회로의 감쇄 주기를 측정함으로써 부하 상태를 검출한다.

입력전류의 기울기는 부하의 크기에 비례하므로 입력전류의 기울기를 측정함으로써 부하의 상태를 간단하게 검출할 수 있다. 그러나 싱글-엔드 공진형 인버터의 경우 고입력 역률을 얻기 위하여 작은 용량의 직류 링크 커패시터를 사용한다.

따라서 만일 부하상태 검출 중 그림 5에 나타낸 바와 같이 입력전압의 순간적인 급변과 왜란이 발

생하게 되면 부하상태 검출의 오류가 발생할 가능성이 크다는 단점이 있다.

한편, 그림 6과 같이 단펄스 구동 시 실제 부하의 유무에 따라 발생하는 스위칭 소자의 전압 파형은 부하가 있을 때는 감쇄계수가 커 공진전압이 빠르게 감쇄하고 부하가 없을 때에는 공진탱크의 에너지 소모가 작기 때문에 스위칭 소자의 파형이 서서히 감소하여 여러 주기의 공진전압이 발생하므로 이 감쇄주기의 차이를 측정하여 부하 상태를 검출하기도 한다.

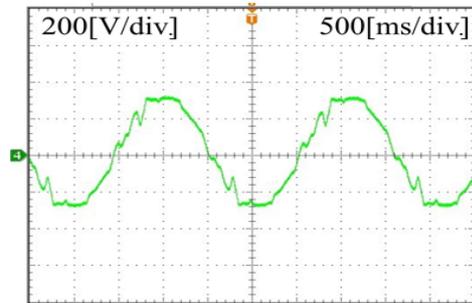
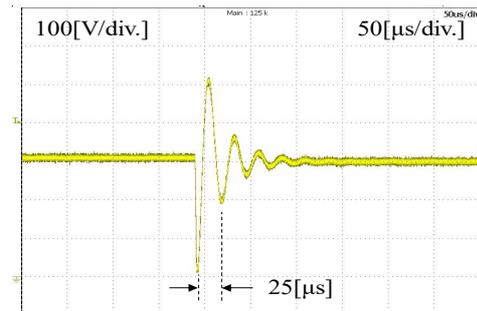
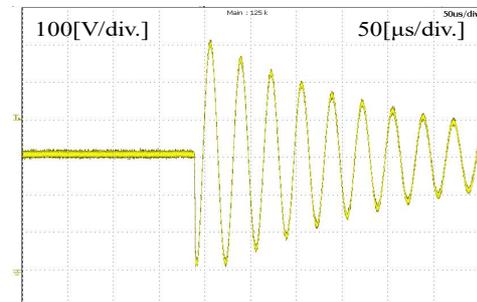


그림 5. 왜란이 있는 전원전압 파형
Fig. 5. Input voltage waveform with distortion



(a) 정상 부하 시
(a) At the normal load



(b) 무부하 시
(b) At the no-load

그림 6. 단펄스 구동 시 스위치 양단 전압 파형 (v_{CE})
Fig. 6. Waveform of voltage across switch in the case of single pulse driving

이 경우도 입력전류의 기울기를 측정하는 방법과 마찬가지로 단펄스를 인가하는 순간 입력전압이 급변 하는 경우 부하상태 검출에 오류를 발생시킬 수 있다.

한편, 종래의 경우 동작 중 부하상태 검출방법은 별도로 제안되거나 적용되지 않았다. 다만 과전압에 의한 스위칭 소자 파손을 방지하기 위하여 공진전압 혹은 스위치 양단전압의 크기가 일정 이상인 경우 인버터 동작을 중지시키는 공진 과전압 보호기능을 이용, 인버터 동작 중에 부하가 갑자기 제거되는 경우 스위치 양단전압의 상승으로 과전압 보호 동작에 의하여 인버터를 정지시키는 방법을 취한다.

그림 7에 인버터 동작 중 조리기가 제거되는 경우, 공진전압이 상승함에 따라 스위치 양단전압의 과전압 보호 동작에 의하여 인버터가 정지되는 파형을 도시한 바와 같이, 부하 제거 시에도 과전압 보호 동작에 의하여 인버터를 정지시키는 것이다.

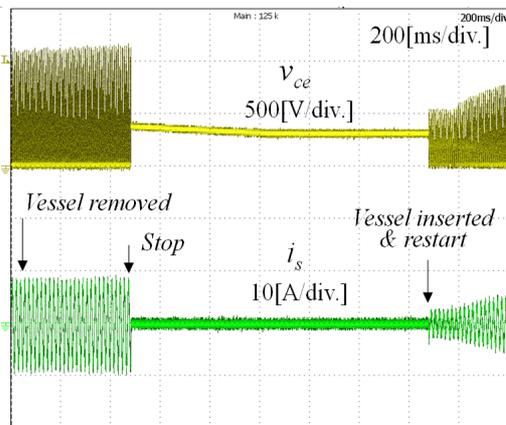


그림 7. 부하제거에 따른 인버터 정지 시의 파형
Fig. 7. Waveforms in the case that the inverter is tripped according to the load removing

3.2 제안하는 부하상태 검출방법

유도가열 조리기기용 인버터는 기동 시에는 물론 동작 중에도 조리기가 제거되는 경우 무부하 상태가 발생할 수 있다. 특히 종래의 경우, 동작 중의 경우에는 별도의 부하상태를 검출하는 방법을 적용하지 않고, 공진전압의 과전압 보호기능에만 의존하였다. 이에 본 논문에서는 기동 시 뿐만 아니라 동작 중의 부하상태를 입력전력의 상태로부터 검출함

으로써 공진전압이 과전압이 되기 이전에 입력전력을 감소시켜 인버터를 안정적으로 운전시킬 수 있는 방법을 제안한다.

3.2.1 기동 시 부하상태 검출방법

싱글-엔디드 공진형 인버터의 스위치 양단 전압은 앞서 살펴 본 바와 같이 입력전압의 크기와 공진전압의 크기에 의하여 결정된다.

본 논문에서는 최악의 상태인 무부하 또는 비정상부하 상태에서도 스위칭 소자에 무리가 가지 않도록 초기 기동 시 약 $3.75\mu\text{s}$ 펄스를 약 $25\mu\text{s}$ 의 주기로 부하상태 검출시간 160ms 동안 인가한다. 이때, 펄스의 폭을 짧게 하는 경우 입력전류 및 공진전압의 크기가 작아지므로 MCU의 A/D에 의해 검출되는 신호의 크기도 작아져 부하 상태를 정확하게 판단하기는 어렵다. 따라서 가능한 한 펄스의 폭을 길게 하는 것이 유리하다. 그러나 펄스의 폭이 너무 길게 되면 무부하 또는 비정상부하 시 큰 공진전압에 의해 스위칭 소자가 소손될 수도 있다. 따라서 무부하 혹은 비정상부하 시의 실험 데이터를 기반으로 유사시 스위칭 소자의 소손을 일으키지 않는 가능한 최대의 펄스폭인 $3.75\mu\text{s}$ 를 기동 시 테스트 펄스폭으로 정하였다.

한편, $25\mu\text{s}$ 의 주기는 그림 6의 (a)와 같이 공진전압의 주기를 고려하여 초기 펄스 이후 공진전압의 골(파저) 부근에서 펄스를 인가함으로써 가능한 한 스위칭 소자에 무리를 주지 않고자 한 것이다. 또한, 기동 시 부하상태 검출 시간은 MCU가 입력전류 및 공진전압의 최대치를 검출하는 주기가 50ms 이므로 판단의 신뢰성 제고를 위해 3회 반복하여 부하상태를 검출할 수 있는 충분한 시간인 160ms 로 정하였다.

부하 검출은 검출 시간동안 발생하는 입력 전원전류와 스위치 양단 전압의 크기를 가지고 판정한다. 전술한 바와 같이, 부하의 특성을 파악하기 위해 약 $3.75\mu\text{s}$ 펄스 신호를 약 $25\mu\text{s}$ 의 오프시간으로 PWM 동작 시키면서 전원전압 $165 \sim 275 V_{rms}$ 의 범위에서 입력 전원전류, 스위치 양단 전압을 측정된 결과를 그림 8과 그림 9에 나타내었다.

그림 8은 전원전압의 변화에 따른 입력 전원전류의 크기를 도시한 것이며, 그림 9는 전원전압의 변화에 따른 스위치 양단 전압 전압의 크기를 나타낸 것으로 그림에서 비정상부하(Abnormal load)는 전용의 밥솥 용기가 아닌 타 재질 중 알루미늄 소재의 용기를 사용하여 측정한 결과이다.

부하에 따른 특성을 평가한 결과, 전원전압의 변동에 따라 입력 전원전류 및 스위치 양단전압은 유사한 경향으로 변화하는 것을 알 수 있다. 다만 비정상부하에서는 스위치 양단 전압이 크게 높아짐을 알 수 있다. 따라서 상기의 실험결과를 바탕으로 부하 검출 판정의 기준전류 i_{check} 는 무부하와 정상부하의 중간 값으로 정해 다음 실험식을 적용하였다.

$$i_{check} = 0.0053 \times V_{s_rms} - 0.01 \quad (13)$$

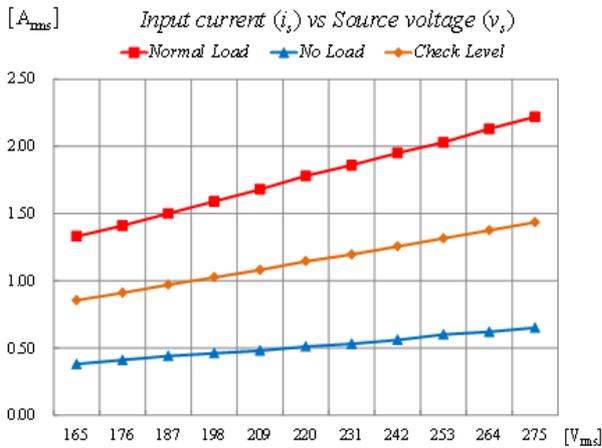


그림 8. 전원전압에 따른 입력전류
Fig. 8. Input current according to the source voltage

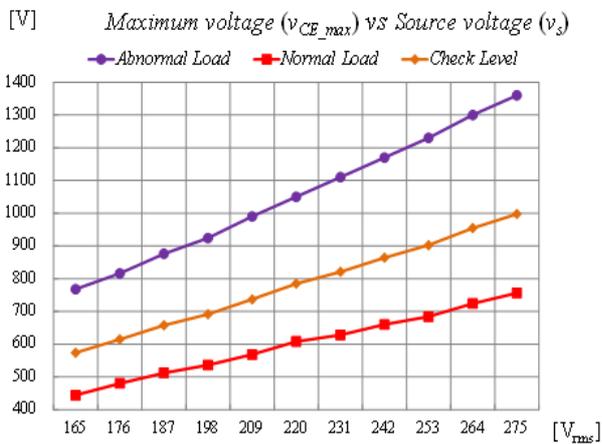


그림 9. 전원전압에 따른 최대 스위치 양단전압
Fig. 9. Maximum v_{CE} according to the source voltage

한편, 스위치 양단의 기준전압 v_{check} 는 스위칭 소자의 내압을 고려하여 비정상부하와 무부하간의 전압차를 6:4 비율로 적용, 다음 실험식을 적용하였다.

$$v_{check} = 3.838 \times V_{s_rms} - 62.764 \quad (14)$$

식 (13)과 (14)를 적용한 부하 검출 판정 기준 일례를 표 1에 나타내었다. 전원전압 220 V_{rms} 에서 부하 검출 판정의 기준전류는 1.15 A_{rms} 이고, 기준 스위치 양단전압은 785V로, 기준 입력전류 이상이면서 기준 스위치 양단전압 이하인 경우에만 정상부하로 판단한다.

표 1. 부하 판단 기준

Table 1. Reference of the load detection

Input voltage [V_{rms}]	165	220	275
Input current [A_{rms}]	> 0.86	> 1.15	> 1.44
Swich voltage [V]	< 574	< 785	< 998

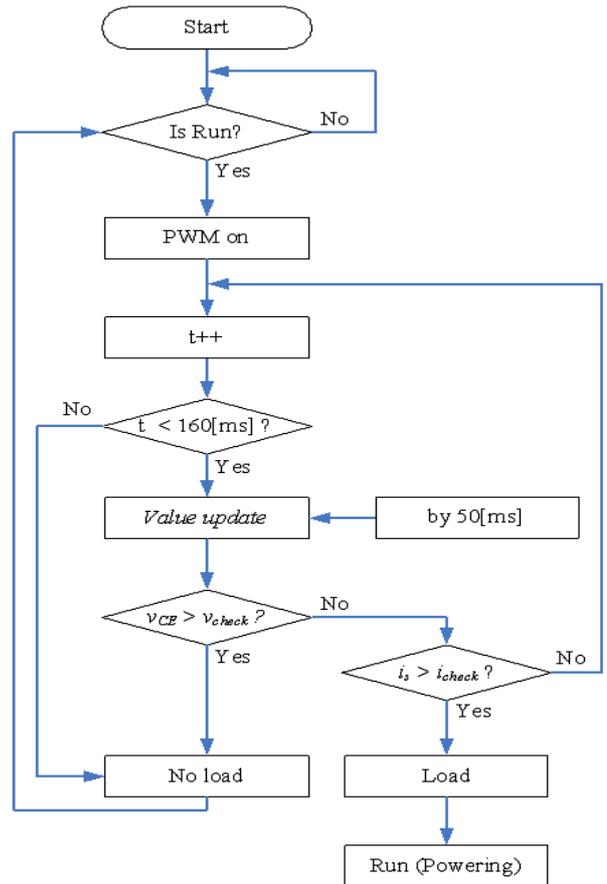


그림 10. 초기 기동 시 부하 검출 흐름도
Fig. 10. Flow-chart of the load stage detection at startup

초기 기동 시 부하 검출에 대한 흐름도를 그림 10에 나타내었다. 초기 동작을 시작하면 테스트 펄스로 인버터를 동작시키고 부하상태 검출 시간동안 매 50ms 마다 입력 전원전류와 스위치 양단전압을 측정하여 기동 시 부하상태 검출을 실시한다. 이 때 스위치 양단 전압을 먼저 측정하여 부하 판정 기준 전압 이상이면 무부하로 판정하여 동작을 정지시키고, 스위칭 양단 전압이 부하 판정 기준전압보다 작으면서 입력 전원전류가 부하 판정 기준전류보다 클 때만 정상부하로 판정한다. 정상부하로 판정된 경우 전력제어 모드로 인버터를 정상운전하게 된다. 그러나 만일 부하 검출 시간 내에 정상부하로 판정되지 않으면 인버터 동작을 정지시킨다.

3.2.2 동작 중 부하 상태 검출

동작 중 부하 상태 검출은 사용자에게 의한 부하 제거를 판단하고자 하는 것이다. 만일 사용자가 조리 용기를 제거하는 경우 인버터가 무부하 상태로 됨에 따라 전력제어에 의해 스위치 양단 전압이 상승, 스위칭 소자의 파손으로 이어질 수 있기 때문에 이에 대하여 대응으로 동작 중 부하상태 검출이 필요한 것이다.

따라서 즉, 인버터 정상동작 중에 부하상태가 크게 변하여도 스위치 양단 전압이 스위치 내압 이상으로 상승하지 않도록 하는 제어가 필요하다.

그림 11에 스위치 양단 전압의 제한 및 입력전력 제어에 대한 제어 블록도를 나타내었다. 입력전력 지령에 대한 PI제어기의 결과를 스위치 양단 전압의 제어기 지령으로 사용함으로써 스위치 양단 전압이 1100V 이상 상승하지 않도록 제한하게 된다.

만일 동작 중 부하가 제거되어 부하 상태가 무부하가 되면 부하로 전달되는 전력이 감소하고 공진 전압은 상승하게 된다. 이 때, 스위치 양단 전압을 제한하게 되면 그 결과로써 입력전력이 낮아진다.

따라서 입력전력의 지령값과 실제 입력전력의 차이를 계산하여 그 차이가 20% 이상인 상태로 400ms 이상 지속되면 부하가 제거된 것으로 판단한다. 동작 중 부하상태 검출 시간을 400ms로 정한 것은, 제어의 성능편차 및 부하전력의 순간적인 변화에 대한 안정화 시간을 고려한 것이다.

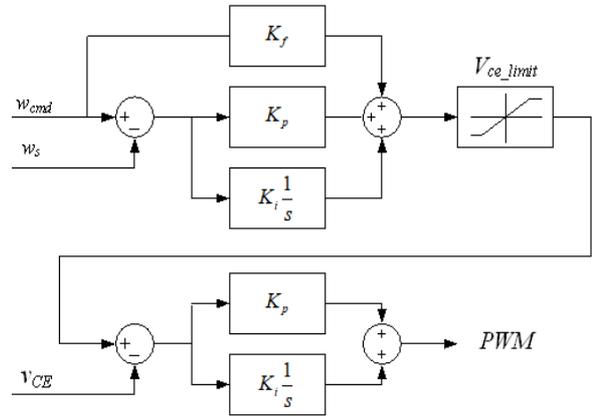


그림 11. 스위치 양단전압 제한 및 전력제어 블록도
Fig. 11. Block diagram for the limit of voltage across switch and the power control

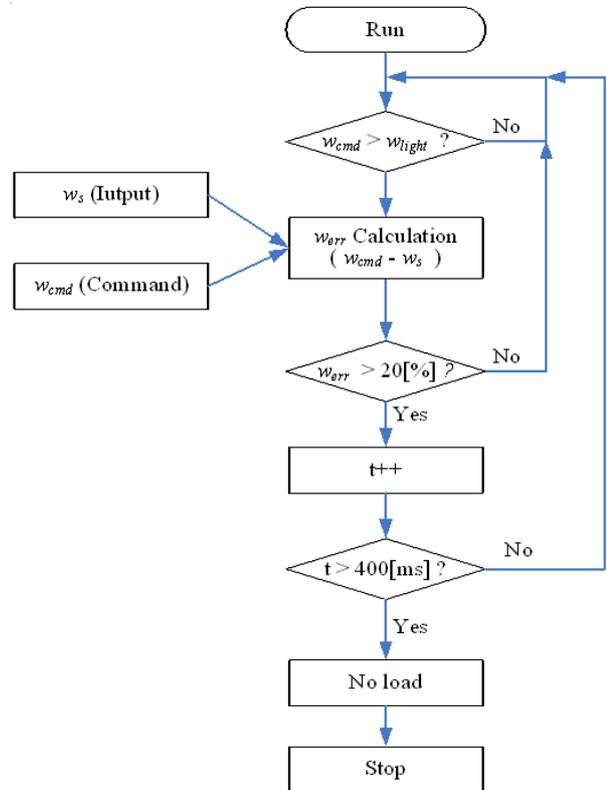


그림 12. 동작 중 부하 검출 흐름도
Fig. 12. Flow-chart of the load detection in operation

그림 12에 이상에서 기술한 동작 중 부하 상태 검출 방법의 흐름도를 나타내었다.

IV. 실험결과 및 고찰

본 논문에서 제안하는 부하상태 검출방법을 가정용 1.3kW 유도가열 밥솥에 적용하여 제안한 방법의 유용성을 검증하고자 하였다.

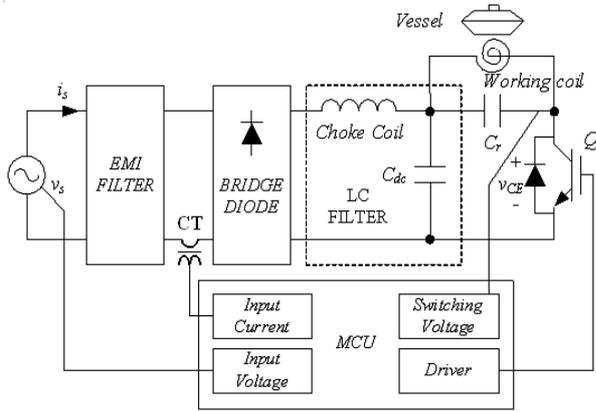


그림 13. 가정용 유도가열 조리기의 구성
Fig. 13. Configuration of IH cooker for kitchen

표 2. 실험회로 정수

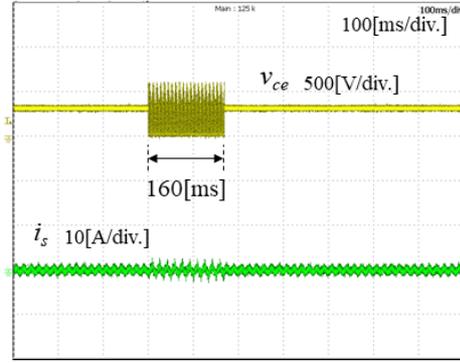
Table 2. Parameter of experimental circuit

Parameter	Value
Source voltage v_s	220 V_{rms}
Input frequency f	60Hz
EMI filter L_1	$C_1 = 2.2\mu F$ $L_1 = 4.7mH$ $C_2 = 0.1\mu F$
Bridge diode D	600V 15A
Input filter inductor L_f	600 μH
Input filter capacitor 커패시터 C_f	7 μF
Resonant capacitor C_r	0.22 μF
Equivalent inductance L_f	90 μH
Equivalent resistance R_{eq}	4 Ω
Switching frequency f_s	24~50kHz
Switching element, IGBT	1350V, 30A
MCU	MC56F8002

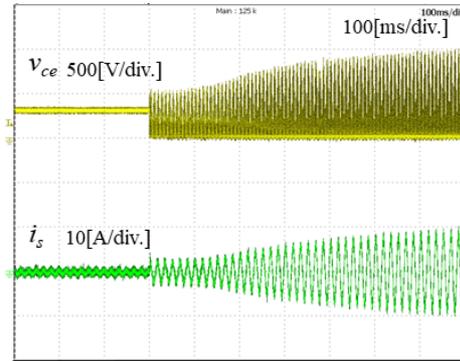
그림 13에 실험에 사용한 유도가열 밥솥의 시스템 구성도를 나타내었다. EMI 필터, 브리지 정류기, 직류 링크, 싱글-엔디드 공진형 인버터 및 제어기로 구성된다.

여기서, 제안한 부하상태 검출을 포함하여 전력 제어 및 상용 전기밥솥에 필요한 모든 제어 기능을 하나의 MCU로 구현하였다. 한편, 실험회로의 주요 정수는 표 2에 나타낸 바와 같다.

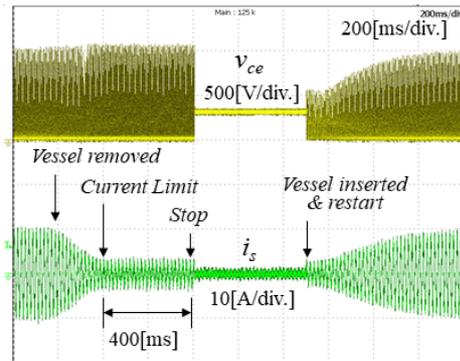
먼저, 전원전압 220V에서 기동 시 부하상태 검출에 대한 실험결과를 그림 14에 나타내었다. 그림 14의 (a)는 전원전압 220V에서 무부하 기동 시 실험 결과로, 160ms 동안 기동 시 부하 검출 알고리즘이 동작하였으나 부하상태가 무부하로 판정되어 인버터 운전을 정지한 경우이다.



(a) 무부하 기동 시
(a) At the starting without load



(b) 정상 부하 기동 시
(b) At the starting with normal load



(c) 동작 중 부하 제거, 투입 시
(c) At the removing and inserting in operation

그림 14. 전원전압 220V에서의 부하 검출 실험결과
Fig. 14. Experimental results of load detection at 220V of source voltage

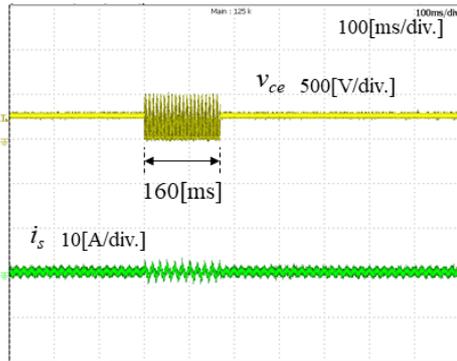
그림 14의 (b)는 전원전압 220V에서 정상적인 부하상태에서 기동하였을 때의 실험파형으로, 부하가 정상으로 판단됨에 따라서 지속적으로 인버터가 운전되는 것을 확인할 수 있다. 기동 시 부하상태가 정상으로 판단되면 인버터는 조리엔 필요한 전력제어 모드로 동작하게 된다.

그림 14의 (c)는 전원전압 220V에서 정상 동작

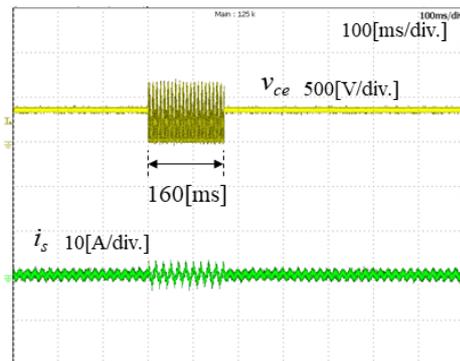
중 인위적으로 부하를 제거 시켰다가 다시 부하를 인가한 경우에 대한 실험결과를 보여주는 것이다.

인버터 동작 중 스위치 양단 전압이 일정 이상이 되지 않도록 제어를 행하기 때문에 스위칭 소자의 파손을 일어나지 않으나, 그 시간이 400msec 이상이 되면 부하가 제거된 것으로 판단하여 인버터 동작을 정지시킨다.

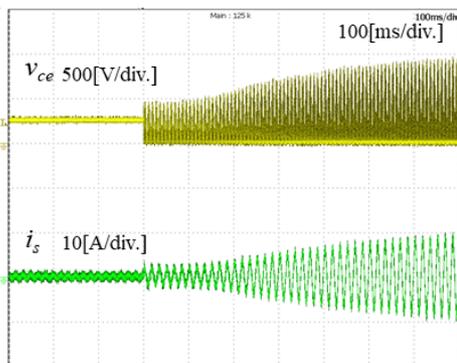
그림 15와 그림 16은 그림 14와 마찬가지로 기동 시 부하상태 검출을 나타낸 실험결과로 전원전압의 전압범위를 고려하여 각각 187V와 253V에서 실험한 결과 파형이다. 기동 시 무부하 상태 검출, 기동 시 정상부하 상태 검출 및 동작 중 부하 검출이 제안한 검출방법에 의해 전원전압의 변동 범위에서 안정적으로 이루어지고 있음을 보여준다.



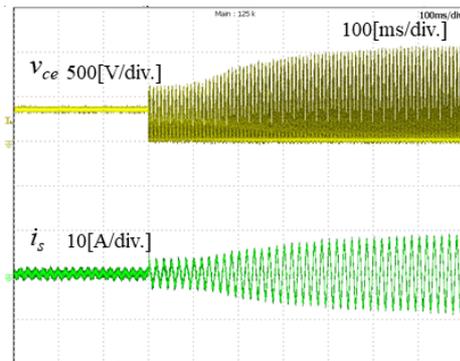
(a) 무부하 기동 시
(a) At the starting without load



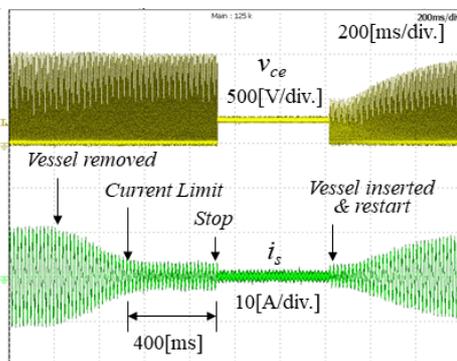
(a) 무부하 기동 시
(a) At the starting without load



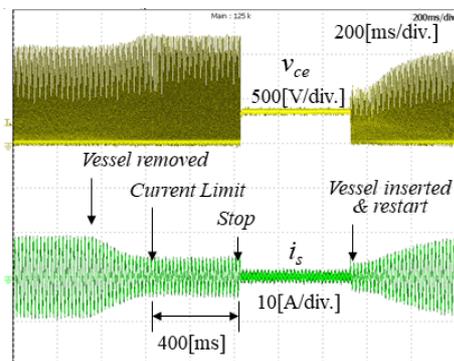
(b) 정상 부하 기동 시
(b) At the starting with normal load



(b) 정상 부하 기동 시
(b) At the starting with normal load



(c) 동작 중 부하 제거, 투입 시
(c) At the removing and inserting in operation



(c) 동작 중 부하 제거, 투입 시
(c) At the removing and inserting in operation

그림 15. 전원전압 187V에서의 부하 검출 실험결과
Fig. 15. Experimental results of load detection at 187V of source voltage

그림 16. 전원전압 253V에서의 부하 검출 실험결과
Fig. 16. Experimental results of load detection at 253V of source voltage

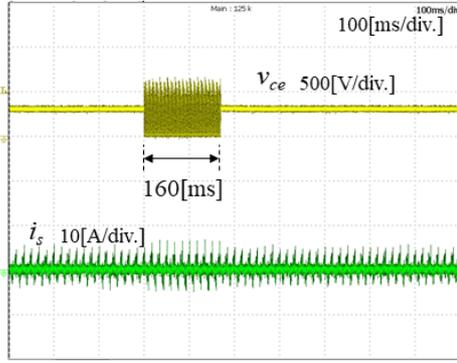
V. 결 론

본 논문에서는 대부분의 가정용 유도가열 밥솥에 적용되는 싱글-엔드드 공진형 인버터의 새로운 부하 검출 방법을 제안하였다. 제안된 검출 방법은 유도가열 부하의 특성을 고려함으로써 종래의 기술보다 입력전압의 변동과 왜란에 강인한 특성을 가지므로 보다 안정적으로 부하상태를 검출할 수 있다. 제안된 초기 기동 시 및 동작 중 부하 검출 방법을 1.3kW 가정용 유도가열 밥솥에 적용한 실험결과로써 제안된 부하 검출 방법의 유용성을 입증하였다. 제안된 방법은 187V, 220V와 253V의 전원전압의 변동 범위 및 최대 156V의 전원전압의 왜곡에서도 안정적으로 부하 상태가 잘 검출됨을 확인하였다.

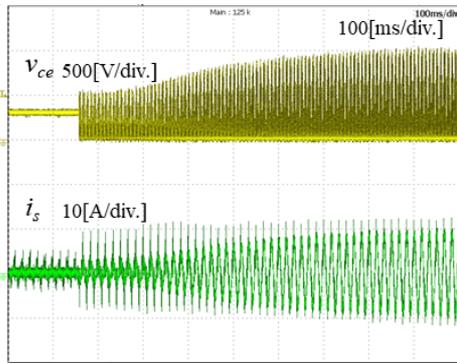
본 논문에서 제안한 방법은 현재 연간 약 50만대 가량의 유도가열 전기밥솥에 적용되고 있으며, 향후 연구과제로는 제안한 기술을 유도가열 레인지에 적용하는 알고리즘을 개발하는 것 등이다.

References

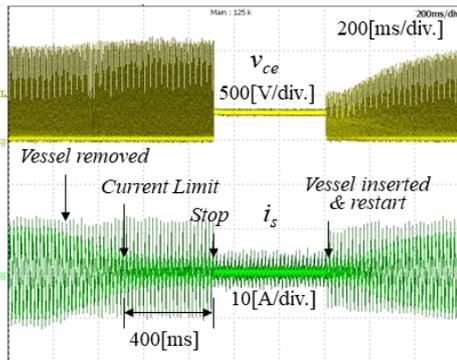
- [1] M. Sweeney, J. Dols, B. Fortenbery, and F. Sharp, "Induction Cooking Technology Design and Assessment", ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, California, pp. 370-379, Aug. 2014.
- [2] Ó. Lucía, P. Maussion, E. Dede, and J. M. Burdío, "Induction heating technology and its applications: Past developments, current technology, and future challenges", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 61, No. 5, pp. 2509-2520, May 2014.
- [3] I. Millán'n, J. M. Burdío, J. Acero, O. Lucía, and S. Llorente, "Series resonant inverter with selective harmonic operation applied to all-metal domestic induction heating", IET Power Electron., Vol. 4, No. 5, pp. 587-592, May 2011.
- [4] J. Yeon, "Induction Cooking Topologies Review and Fairchild's Field-stop IGBTs", Fairchild semiconductor, 2012.
- [5] H. Tanimatsd, T. Ahmed, I. Hirod, K. Yasui, T. Iwai, H. Omori, N. Ahmed H. Lee, and M.



(a) 무부하 기동 시
(a) At the starting without load



(b) 정상 부하 기동 시
(b) At the starting with normal load



(c) 동작 중 부하 제거, 투입 시
(c) At the removing and inserting in operation

그림 17. 왜란 전압하의 부하 검출 실험결과
Fig. 17. Experimental results of load detection at 220V of distorted source voltage

끝으로, 그림 17에 전원전압에 왜곡이 있을 때의 부하상태 검출에 대한 실험결과를 나타내었다. 전원 공급 시뮬레이터를 사용하여 그림 5와 동일한 파형을 발생시켰다. 최대 전압변동은 57도 근처에서 156V이다. 전원 왜란은 공장 밀집 지역에서 자주 발생하며 실험결과 제안한 방법은 전원 왜란 하에서도 부하상태를 잘 검출하고 있음을 확인하였다.

Nakaoka, "Two-Switch Boost-Half Bridge and Boost Active Clamped ZVS-PWM AC-AC Converters for Consumer High Frequency Induction Heater", Applied Power Electronics Conference and Exposition, Austin, TX, USA, pp. 1124-1130, Mar. 2005.

[6] N. R Bhasme and B. Mandval, "Topologies of Voltage Source Inverter for Domestic Induction Heating", Journal of Scientific & Engineering Research, Vol. 6, No. 6, pp. 121-126, Jun. 2015.

[7] J. Yeon, M. Park, K. Cho, and H. Kim, "A new high voltage shorted-anode IGBT with intrinsic body diode improves performance of single-ended induction cooker", 2013 15th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE), Lille, France, pp. 1-9, Sep. 2013.

[8] J. Yeon, K. Cho, and H. Kim, "A 3.6kW Single-ended Resonant Inverter for Induction Heating Applications", Conference on Power Electronics and Applications, Geneva, Switzerland, pp. 1-7, Sep. 2015

[9] Fairchild semiconductor, "Induction Heating System Topology Review", AN-9012, Rev 1.0.4 12/18/13, 2000.

[10] V. Crisafulli, "New IHR Field Stop II IGBT technology, the best efficiency for high frequency Induction Cooking Applications", PCIM Europe 2014; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management, Nuremberg, Germany, pp. 1-8, May 2014.

[11] M. Pérez-Tarragona, H. Sarnago, Ó. Lucía, and J. Burdío, "Design and Experimental Analysis of PFC Rectifiers for Domestic Induction Heating Applications", in IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 33, No. 8, pp. 6582-6594, Aug. 2018.

[12] J. Lim, J. Ju, K. Kang, S. Bang, and G. Choe, "A Study of Detection Algorithms and Analysis Series Arc of Quasi-arc Load", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical

Installation Engineers, Vol. 28, No. 7, pp. 81-90, Jul. 2014.

[13] O. Lucia, J. Burdío, I. Millan, J. Acero, and D. Puyal, "Load-Adaptive Control Algorithm of Half-Bridge Series Resonant Inverter for Domestic Induction Heating", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 56, No. 8, pp. 3106-3116, Aug. 2009.

[14] Y. Oh, J. Yeon, K. Cho, and H. Kim, "Resonant voltage limiting technique of single-ended resonant inverter for induction heating", in Electronics Letters, Vol. 53, No. 12, pp. 804-806, Jun. 2017.

[15] Freescale Semiconductor, "Designing an Induction Cooker Using the S08PT Family", AN5030, Rev.0 11/2014, 2014.

[16] Y. Oh, C. In, and K. Cho, "Detection Method of Load State of Induction Heating Cooker", Record of Information and Control Symposium (ICS'2019), Gunsan, Korea, pp. 172-174, Apr. 2019.

저자소개

오 용 승 (Yong-Seung Oh)



2001년 2월 : 한양대학교
전기공학과(공학사)
2018년 8월 : 한양대학교 전기전자
제어계측공학과(공학박사)
2003년 3월 ~ 현재 : (주)월링스
연구소장
관심분야 : 공진형 인버터, 태양광
인버터, 신재생 에너지 시스템, LED 조명 제어

조 규 민 (Kyu-Min Cho)



1985년 2월 : 인하대학교
전기공학과(공학사)
1994년 8월 : 인하대학교
전기공학과(공학박사)
1995년 3월 ~ 현재 : 유한대학교
정보통신공학과 교수
관심분야 : 각종 전력변환기,
통신응용 시스템 제어, LED 조명 제어