

## AFCI용 ASIC의 온도보상에 관한 연구

(A Study on the Temperature Compensation of ASIC for AFCI)

양승국\* · 이 주\*\*

(Seung-Kook Yang · Ju Lee)

### Abstract

In order to avoid the electrical fire, AFCI(Arc Fault Circuit Interrupter) has been obligated to be adopted in the United States of America since 2002. AFCI using line resistor of neutral trace needs to compensate the variation of the line resistance by temperature variation. In this paper, the ASIC including the temperature compensation circuit is implemented. The proposed implementation is verified by showing the effectiveness of an electric and a temperature characteristics for Arc signals by simulation results.

Key Words : AFCI, Arc Fault, Neutral Trace, Temperature Compensation

### 1. 서 론

1999년 미국 UL(Underwriters Laboratories)에서는 전기화재 예방을 위하여 AFCI(Arc Fault Circuit Interrupter)에 대한 규격 UL1699를 제정하였으며 NEC(National Electric Code)에서는 2002년부터 전기화재 보호를 위하여 AFCI의 사용을 의무화하였으며 2011년 Edition에서는 그 사용 범위를 가정의 모든 거

주공간으로 확대하였다[1].

일반적으로 AFCI의 아크전류의 검출방법은 변류기(C.T, Current Transformer)에 의한 아크검출방식을 주로 사용하고 있으나[2] 최근에는 원가절감을 위하여 중성선(Neutral Trace)의 선로저항을 이용한 아크검출 방법을 사용하게 되었다.

이러한 중성선 선로저항을 이용한 방법은 중성선 선로저항이 온도변화에 따라 선로저항값이 변함으로 저항온도계수(TCR, Temperature Coefficient of Resistance)에 대한 온도보상회로가 필요하며 일반적으로 이 온도보상회로는 OP-Amp와 정 온도계수(PTC, Positive Temperature Coefficient) 또는 부 온도계수(NTC, Negative Temperature Coefficient) 저항을 이용하여 구현하였다[4].

그러나 전자회로의 경박단소(經薄短小)화 및 원가 절감을 위하여 AFCI의 아크검출 회로를 주문형 반도체(ASIC, Application Specific Integrated Circuit)로

\* 주저자 : 한양대학교 대학원 전기공학과 박사과정

\*\* 교신저자 : 한양대학교 전기제어공학전공 부교수

\* Main author : Department of Electrical Engineering, Graduate School of Hanyang University, Korea

\*\* Corresponding author : Division of Electrical and Biomedical Engineering, Hanyang University, Korea

Tel : 031-8040-9757, Fax : 031-8040-9749

E-mail : skyang@danam.co.kr

접수일자 : 2013년 10월 7일

1차심사 : 2013년 10월 9일

심사완료 : 2013년 11월 7일

집적화가 요구되면서 온도보상회로 또한 ASIC 내부에 구현이 필요하게 되었다.

본 논문에서는 중성선 선로저항을 아크검출용 센서로 사용하는 AFCI에 대하여 아크검출회로를 Bi-polar 공정을 사용하여 ASIC을 구현하는 경우 ASIC 내부에 온도보상회로를 집적화시키는 방안을 제시하고 H-Spice를 이용하여 시뮬레이션하여 전기적 특성을 평가 및 검증하였다.

## 2. 아크의 검출 방식

AFCI에서 아크를 검출하는 가장 일반적인 방법은 그림 1과 같이 기존의 누전차단기나 GFCI(Ground Fault Circuit Interrupter)에서 사용하는 방법과 같이 전류검출센서인 변류기를 사용하여 일차 측 도선에 흐르는 전류량과 변류기의 권선비에 의한 2차측 전류를 발생하여 부하저항을 통하여 전류를 전압으로 변환하는 방식을 사용하였다[3]. 그러나 이런 방법은 변류기의 코어 단면적에 의하여 포화전류가 결정되어 포화되기 쉽고 전류량의 변화에 따른 출력전류의 선형성이 나빠지며 변류기의 가격이 높아 원가상승의 주요원인이 된다.

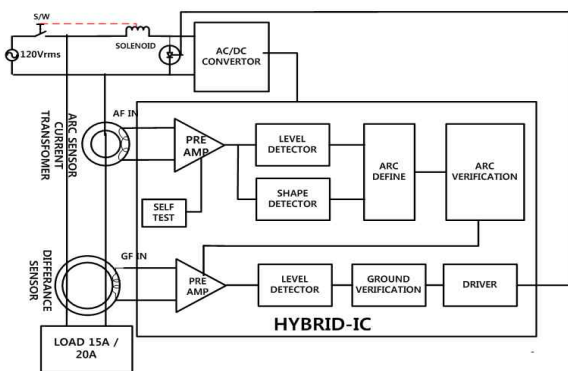


그림 1. 변류기를 이용한 AFCI의 블록도  
Fig. 1. AFCI Block diagram with current transformer

최근에는 그림 2와 같이 중성선에 흐르는 전류와 중성선 선로 양단의 저항차이에 의하여 발생하는 전압차를 직접 검출하는 방법을 이용한 아크를 검출하는 방법을 사용한다.

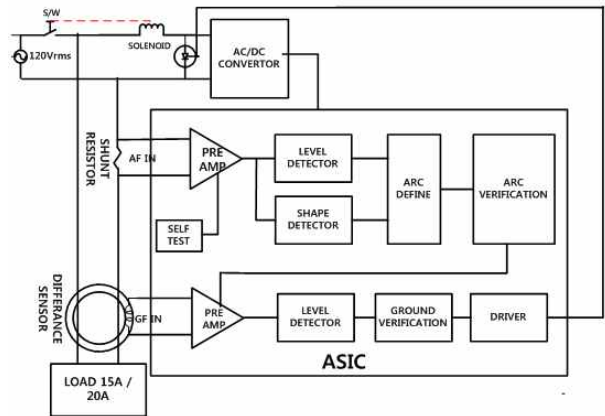


그림 2. 중성선 선로저항 검출방식의 AFCI 블록도  
Fig. 2. AFCI Block diagram with neutral trace resistor

이와 같이 중성선의 선로저항을 아크 검출용 센서로 사용하는 경우 일반적으로 중성선 선로는 구리가 주 성분인 구리판재를 가공하여 사용하는데 이 구리판재의 온도저항계수가 약 4,300PPM의 정 온도계수를 갖고 있어 그림 3과 같이 전치 증폭기의 출력이 온도에 따라서 출력이 증가하는 것을 알 수 있다.

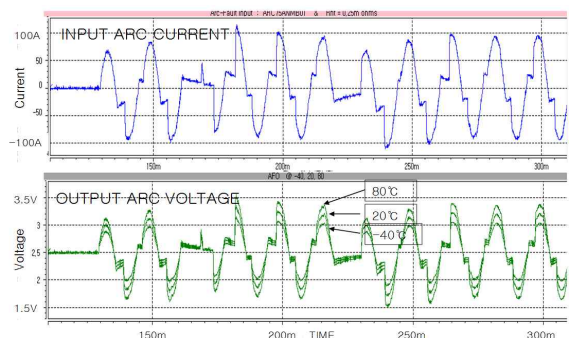


그림 3. 온도변화에 의한 Pre-amp 출력전압의 변화  
Fig. 3. Pre-amp output voltage by temperature change

이러한 경우 온도변화에 따른 Pre-Amp의 출력의 영향을 보상하여야 하며 일반적으로 OP-Amp를 이용한 1단 증폭회로에 정 온도계수의 써미스터 저항이나 부 온도계수의 써미스터 저항을 사용하여 온도에 따른 출력전압의 변화를 보상하는 방법을 사용한다[4].

### 3. 온도보상 방안

중성선 선로저항을 아크검출용 센서로 사용하는 AFCI에 대하여 아크검출회로를 Bi-polar 공정을 사용하여 ASIC으로 집적화 할 경우 온도보상회로를 반도체에서 구현하기 위한 온도보상 방안으로 정 온도계수 특성의 내부등가저항의 구성방안을 제시하고자 한다.

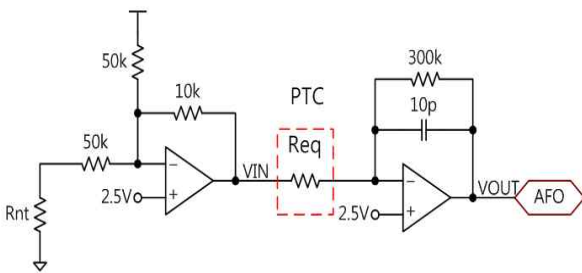


그림 4. 정 온도계수(PTC) Bias를 갖는 증폭회로  
Fig. 4. Amplifier circuit with PTC bias

그림 4와 같이 Pre-Amp를 2단 증폭회로로 구성하면 증폭기의 출력전압(VOUT)은 식 (1)과 같이 중성선 선로저항(Rnt)와 ASIC의 내부등가저항(Req)의 저항값의 비로써 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 V_{OUT} &= -V_{IN} \cdot \frac{300K}{R_{eq}} \quad (1) \\
 &= I_{IN} \cdot R_{nt} \cdot \frac{10K}{50K} \cdot \frac{300K}{R_{eq}} \\
 &= I_{IN} \cdot 60K \cdot \frac{R_{nt}}{R_{eq}}
 \end{aligned}$$

만약 내부등가저항의 온도특성이 중성선 선로저항의 온도특성과 같다면 증폭기의 출력전압은 온도변화에 따른 영향을 안 받을 수 있다.

따라서 ASIC의 내부등가저항의 온도특성을 중성선의 선로저항의 온도특성과 같은 온도계수의 특성을 갖게 하기 위하여 내부등가저항의 회로를 ASIC 내의 기준전압(VREF)과 외부저항(Rext)을 이용하여 조정할 수 있도록 미러회로를 이용한 Bias 회로를 구성하였다.

이때 Bias 회로에 흐르는 전류는  $I = I_s \cdot e^{\frac{V}{V_T}}$  이므로 이를 미분하면  $\frac{dI}{dV} = I_s \cdot e^{\frac{V}{V_T}} \cdot \frac{1}{V_T} = I \cdot \frac{1}{V_T}$  이 된다.

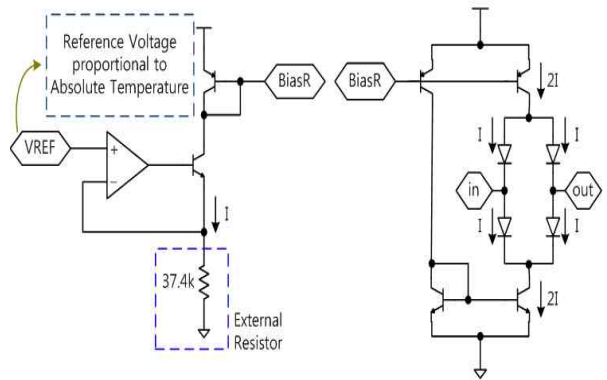


그림 5. 정 온도계수 특성의 BIAS 회로  
Fig. 5. Bias circuit of PTC characteristic

따라서 식 (1)의 내부등가저항은 식 (2)와 같이 기준 전압과 외부저항값으로 표현할 수 있다.

$$R_{eq} = \frac{\Delta V}{\Delta I} = \frac{V_T}{I} = \frac{kT}{q} \cdot \frac{R_{ext}}{V_{REF}} \quad (2)$$

(k : 볼츠만상수  $1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ )

T : 절대온도

q : 전하량  $1.6 \times 10^{-19}$

$V_T$  : 열전압)

식 (1)과 식 (2)을 정리하고 각 소자의 온도계수를 적용하면 온도특성 관계식은 식 (3)과 같이 표현된다[5].

$$\frac{R_{nt}}{R_{eq}} = \frac{V_{REF} \cdot R_{nt} \cdot (1 + TC_{R_a}(T-25)) \cdot (1 + TC_{V_{REF}}(T-25))}{\frac{kT}{q} \cdot R_{ext} \cdot (1 + TC_{V_T}(T-25)) \cdot (1 + TC_{R_{ext}}(T-25))} \quad (3)$$

$$\frac{R_{nt}}{R_{eq}} = \frac{V_{REF} \cdot R_{nt} \cdot \{1 + [TC_{R_a} + TC_{V_{REF}} + TC_{R_a} \cdot TC_{V_{REF}}(T-25)](T-25)\}}{\frac{kT}{q} \cdot R_{ext} \cdot \{1 + [TC_{V_T} + TC_{R_{ext}} + TC_{V_T} \cdot TC_{R_{ext}}(T-25)](T-25)\}}$$

따라서 온도계수와 관련된 항을 등가로 정리하면 기준전압의 온도계수를 식 (4)와 같이 정리할 수 있다.

$$1 = \frac{\{1 + [TC_{R_{ct}} + TC_{V_{REF}} + TC_{R_{ct}} \cdot TC_{V_{REF}}(T-25)](T-25)\}}{\{1 + [TC_{V_T} + TC_{R_{ct}} + TC_{V_T} \cdot TC_{R_{ct}}(T-25)](T-25)\}}$$

$$[TC_{R_{ct}} + TC_{V_{REF}} + TC_{R_{ct}} \cdot TC_{V_{REF}}(T-25)]$$

$$= [TC_{V_T} + TC_{R_{ct}} + TC_{V_T} \cdot TC_{R_{ct}}(T-25)]$$

$$[1 + TC_{R_{ct}}(T-25)] TC_{V_{REF}}$$

$$= [TC_{V_T} + TC_{R_{ct}} + TC_{V_T} \cdot TC_{R_{ct}}](T-25) - TC_{R_{ct}}$$

$$TC_{V_{REF}} = \frac{TC_{V_T} + TC_{R_{ct}} + TC_{V_T} \cdot TC_{R_{ct}}(T-25) - TC_{R_{ct}}}{1 + TC_{R_{ct}}(T-25)} \quad (4)$$

식 (4)에 각 소자의 온도계수를 대입하면

$$TC_{V_{REF}} = \frac{0.087m + 0.1m + 0.087m \cdot 0.1m(T-25) - 4.3m}{1 + 4.3m(T-25)}$$

$$\approx -4.113m/^{\circ}C$$

기준전압의 온도특성계수는  $-4.113mV/^{\circ}C$ 의 값을 갖는다. 이에 Pre-Amp의 증폭도를 30배로 정의할 경우 내부등가저항(Req)은  $2k\Omega$ 가 되며 식 (2)에서 열전압( $V_T$ )은  $25.7mV$ 이므로 외부저항에 흐르는 전류는  $12.85\mu A$ 가 된다. 따라서 외부저항을  $37.4k\Omega$ 로 설계할 경우 기준전압을  $0.4806V$ 가 되며 이 기준전압의 온도특성은 식 (5)와 같이 표현할 수 있다.

$$V_{REF} = 0.4806 * (1 + TC_{V_{REF}} * (T-25)) \quad (5)$$

#### 4. 시뮬레이션 모형 및 결과

이상과 같이 그림 4에 도시된 증폭회로에 대하여 내부등가저항을  $2k\Omega$ 로 구성하여 온도변화에 따른 증폭도를 시뮬레이션한 결과 증폭도의 변화가 38.6%의 변화 폭이 3.33%로 줄어든 것으로 볼 수 있다.

그림 2와 같은 아크검출 알고리즘에서의 Pre-Amp의 출력의 변화는 솔레노이드를 구동시키기 위한 SCR의 Gate 신호를 측정하여 응답시간의 변화로 특성을 확인할 수 있다.

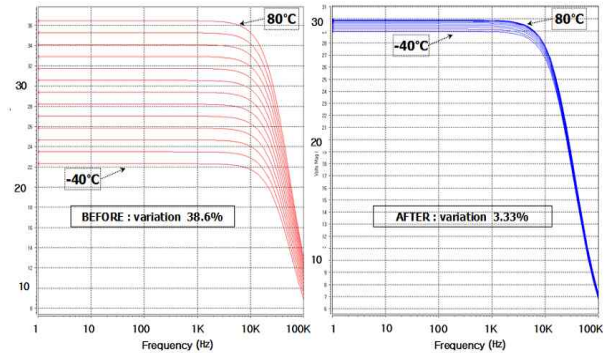


그림 6. 정 온도계수(PTC) 방식의 증폭도 변화  
Fig. 6. Gain change of PTC method

일반적으로 AFCI의 동작시간은 발생한 아크전류에 비례하고 중성선 선로저항값에 반비례하는데 제안한 Bias 회로가 중성선 선로저항 값의 변화 및 아크전류에 따라서 출력특성 및 Trip 시간에 영향을 평가하기 위하여  $90^{\circ}$  위상제어를 한 이상적인 아크신호에 대하여 상온에서 중성선 선로저항값을  $0.225m\Omega \sim 0.275m\Omega$  변화시키면서  $50Arms \sim 70Arms$ 의 아크전류에 대하여 시뮬레이션한 결과 Pre-Amp의 출력전압의 변화가 선로저항값에 비례하여 증가하는 것으로 나타나며 Trip 시간은 선로저항값에 반비례하고 아크전류값에 반비례하는 것을 확인할 수 있었다.

표 1. Rnt값 변화 따른 Trip 시간  
Table 1. Trip time by Rnt value change

		0.275mΩ	0.25mΩ	0.225mΩ
Ideal	70Arms	20 ms	22 ms	27 ms
	Arc	35 ms	44 ms	60 ms

실제  $75Arms$ 의 전류를 전선의 종류별로 아크를 발생시켜 측정된 아크파형을 Modeling하여 이 신호를 Test Vector로 사용하고 ASIC의 동작온도를  $-40^{\circ}C \sim 80^{\circ}C$ 로 변화시키면서 시뮬레이션하면 온도변화에 따른 Pre-Amp의 출력전압의 변화가 거의 없고 온도에 따른 Trip 시간이  $37ms \sim 46ms$ 와  $34ms \sim 45ms$ 로 나타나 약  $10ms$  정도의 작은 시간차가 발생하였으며 이 결과는 제안 한 온도보상 회로가 정상적으로 동작되는 것을 확인할 수 있었다.

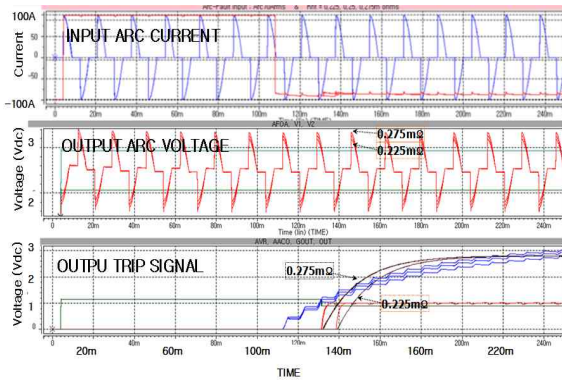


그림 7. Rnt값 변화 따른 Trip 시간  
Fig. 7. Trip time by line resistance change

표 2. 온도변화에 대한 Trip 시간  
Table 2. Trip time by temperature change

		-40℃	25℃	80℃
Arc75A	NB-01	37 ms	39 ms	46 ms
	NB-02	34 ms	42 ms	45 ms

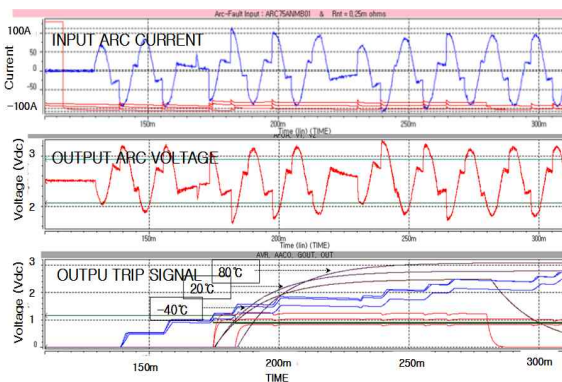


그림 8. 온도변화에 대한 Trip 시간  
Fig. 8. Trip time by temperature change

### 5. 결 론

본 논문에서는 전기화재 보호를 위하여 사용되는 AFCI 중 아크신호를 검출하기 위하여 중성선의 선로 저항을 아크검출용 센서로 사용하는 경우 온도변화에 따라 선로저항값의 변화에 의하여 AFCI가 오동작하게 되는데 이를 방지하기 위하여 Bi-polar 공정을 이용하여 ASIC화하는 경우 온도변화에 따른 증폭도를 보상하여 출력전압을 일정하게 유지하는 온도보상 방

안을 제시하였다.

이에 따른 검증용 Modeling 한 아크신호를 이용하여 시뮬레이션을 통하여 검증한 결과 온도변화에 따른 Pre-AMP의 출력의 변화가 38.6%에서 3.33%로 감소되는 것을 확인할 수 있었고 TRIP시간의 편차가 10ms이하의 결과를 얻었다, 따라서 제시한 온도보상 회로를 ASIC화하는 것이 가능함을 확인할 수 있었다.

### References

- [1] National Electrical Code, ARTICLE 210-Branch Circuits 210-12, 2011 Edition.
- [2] Gi-Jong Ban, Lark-Kyo Kim “Arc Fault Circuit Interrupt Design for Electrical Fire Protection” KIEE v.55 no.5, 2006, p.p. 220-225.
- [3] Gi-Jong Ban, Lark-Kyo Kim “Control Algorithm Development for an Arc Current Interruption” KIEE v.53 no.3, 2004, p.p. 166-172.
- [4] Evans “AFCI Temperature Compensation Current Sensor” . United States Patent 7,492,562 Feb. 17, 2009.
- [5] Sedra. Smith “Micro-electronic Circuits Fifth Edition” Oxford.

### ◇ 저자소개 ◇



**양승국 (梁承國)**

1964년 5월 25일생. 1987년 단국대학교 전자공학과 졸업. 2009년 서울산업대학교 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 한양대학교 전기공학과 박사과정. 현재 단암시스템즈(주) 수석연구원.



**이 주 (李 柱)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 일본 큐슈대학교 전기공학과 졸업(박사). 현재 한양대학교 전기제어생체공학부 교수.