[Research Paper]

단상 유도전동기의 구속운전조건에서 화재 위험성에 관한 연구

지흥근[†] · 송재용

국립과학수사연구원 연구관

Study on the Fire Risk in Locked-Rotor Condition of Single-Phase Induction Motor

Hong-Keun Ji[†] · Jae-Yong Song

Senior Researcher, National Forensic Service

(Received February 11, 2020; Revised March 5, 2020; Accepted March 26, 2020)

요 약

본 논문에서는 단상 유도전동기의 구속운전조건에서 화재 위험성에 관하여 기술하였다. 일반적으로 전동기의 고장 발생은 회전자의 회전 불량 등으로 인한 구속운전조건인 형태로 나타난다. 전동기의 기동 시에는 정격전류의 약 2~15배에 달하는 큰 돌입전류가 흐르게 되는데 단상 유도전동기에서 구속운전조건이 발생하게 되면 돌입전류에 준하는 전류가 지속적으로 고정자권선을 통해 흐르게 된다. 구속운전조건에서 고정자권선을 통해 흐르는 과전류에 의해 고정자 권선 내부의 온도가 상승하고, 최종적으로 절연물을 매개로 화재로 이어지는 특징이 나타난다. 본 논문에서는 임의로 구속운전조건을 만들고, 이때 고정자권선에 흐르는 과전류의 크기 및 온도 상승을 측정하였다. 실험결과로부터 구속운전조건에서는 정격전류에 비해 약 7배의 과전류가 발생하였으며, 고정자권선 내부의 온도가 약 300℃ 정도에서 화재로 진전되는 것을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, the fire risk of a single-phase induction motor under a locked-rotor condition is described. In general, motor failure occurs in the locked-rotor condition owing to poor rotation of the rotor. Large inrush current flows when a motor starts, which is approximately 2-15 times larger than the rated current. In a single-phase induction motor under the locked-rotor condition, a large current that corresponds to the inrush current flows continuously through the stator winding. Such an overcurrent rises the temperature inside the stator winding, and thus the insulating material may catch fire. In this study, the restrained operating condition of the single-phase induction motor was simulated. Further, the degree of the overcurrent and temperature rise in the stator winding was measured. The experimental results, confirmed that the overcurrent was seven times larger than the rated current and the fire commenced at a temperature of approximately 300℃ inside the stator winding.

Keywords : Fire risk, Single phase induction motor, Inrush current, Locked rotor condition, Stator winding

1. 서 론

현대사회의 산업 발달과 생활 수준 향상 등을 위해 다양한 전기기기의 보급이 확대되고 있으며, 전기기기의 종류 및 기능의 다양성과 고급화로 인하여 전력수요는 해마다 증가하고 있다. 전기에너지의 사용은 현대생활에 있어서는 필수 불가결의 요소로 자리 잡고 있으며, 전력수요의 증가에 따라 전기에너지 사용 과정에서의 사건 사고 또한 증가하는 양상을 나타내고 있다^(1,2). 다양한 전기기기 중에서도

가장 광범위하게 사용되고 있는 것은 전기에너지를 기계에너지로 변환하기 위한 전동기가 가장 대표적이라고 할 수 있다. 전동기의 경우, 산업 분야 및 일상생활에 광범위하게 적용되고 있으며, 부적절한 사용이나 고장으로 인해 직접적인 화재원인이 되기도 한다. 전동기의 고장 유형은 과부하 사용 또는 구조적 결함으로 인해 회전 불량이 발생하는 양상으로 나타나고 있으며, 이때 과전류가 발생하여 최종적으로 화재가 발생하는 형태를 보이고 있다⁽³⁻⁶⁾.

이러한 관점에서 본 연구에서는 임의로 회전불량 상태인

[†] Corresponding Author, E-Mail: adonis1024@gmail.com. TEL: +82-55-380-4151, FAX: +82-55-380-4160

© 2020 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

구속운전조건을 만들고, 회전불량으로 인해 나타나는 고정자권선에서 과전류의 크기 및 온도 상승을 측정 분석하였으며, 화재 발생 과정에 대한 실험적 연구를 진행하였다.

2. 전동기 개요 및 화재사례

2.1 전동기 개요⁽⁷⁾

전구나 전열기 같은 기기들은 전기에너지를 필요로 하며, 반면 환풍기나 압연기 같은 기기들은 기계 에너지를 필요로 한다. 전기적인 입력을 기계적인 출력으로 바꾸거나, 반대로 기계적인 입력을 전기적인 출력으로 바꾸는 변환기가 전기기기이며, 이와 같은 과정이 Figure 1에 나타난 바와 같이 전기 역학 에너지 변환 과정이다. 전기 역학 에너지 변환에 사용되는 전기기기 중, 전동기는 전기 에너지를 기계 에너지로 변환하는 대표적인 전기기기이며, 일상생활에서도 광범위하게 적용되고 있다.

전동기는 자기장 내에 있는 도체에 전원 공급을 통한 전류가 흐르면 각 도체에는 힘이 발생하고, 도체가 자유로이 회전할 수 있는 경우 토크가 발생하여 회전자가 돌게 된다. 전동기는 공급되는 전원에 따라 직류기 및 유도기로 구분되고, 가장 광범위하게 사용하는 전동기는 단상 유도전동기이다. 단상 유도전동기는 튼튼하고 가격이 싼 장점으로 널리 사용되고 있으며, Figure 2에 나타난 바와 같이 고정자와 회전자로 구성된다. 고정자 권선에 전류가 흐르면 전자기 유도 작용에 따라 회전자가 회전하는 원리로 동작한다. 단상 유도전동기는 농형의 회전자와 단상 분포권선형 고정자로 이루어지며, 이론적으로 회전자계를 만들 수 없어 기동토크를 발생시킬 수 없는 구조이다.

단상 유도전동기에서 회전자계를 형성시켜주기 위해 보조권선을 설치하여 주권선과 보조권선에 흐르는 전류의 위상각을 만들어 주어 회전자계를 형성시킨다. Figure 3의 등가회로와 같이 보조권선에 기동용 콘덴서를 설치하는 경우에는 주권선과 보조권선 사이의 위상각을 넓혀 보다 큰 기동토크를 얻을 수 있다.

2.2 전동기 화재사례

단상 유도전동기는 가정용 및 산업용으로 광범위하게 사용되고 있으며, 이로 인한 화재사고 또한 사용량 증가와 더불어 늘어나고 있는 추세이다. 전동기에서는 전원배선의 단락, 접속부에서의 불완전 접속, 고정자 권선에서의 절연

파괴(층간 단락) 및 경년열화 등의 원인으로 화재가 발생되는 것으로 알려져 있다. 전동기와 관련한 화재사고의 정확한 통계는 따로 구분되어 있지 못한 실정이지만, 2019년 기준 대략 300여건의 화재가 발생되는 것으로 추정되고 있으며, 전동기 내부 고정자 권선에서의 층간단락으로 인한 화재가 106건을 차지하고 있다⁽¹⁾.

Figure 4에 나타난 사례는 선풍기 모터로 적용된 75 W 단상 유도전동기에서 발생한 화재 사고이며, 전원배선에서 단락흔이 식별되고, 고정자 권선에서 층간단락흔이 형성된 모습을 보이고 있다. 전동기의 전원배선에 비해 내부 고정자 권선이 최종 부하 측에 해당되는 바, 고정자 권선에서 절연파괴가 발생하는 과정에서 화재가 발생된 것으로 판단되어진 사례이다.

Figure 5에는 500 W 단상 유도전동기를 적용하는 공기압축기에서 발생한 화재사례로 전원배선에서 단락흔 등의 전기적 특이점은 식별되지 않고, 고정자 권선 3개소에서 층간단락흔이 식별되는 모습을 나타내고 있다. 고정자 권선에서 층간단락흔이 식별되는 상태를 고려할 경우, 내부에서 절연파괴 또는 고정자권선의 과열 등이 발생되면서 화재가 발생한 것으로 볼 수 있는 사례이다.

앞서 언급한 화재사례에서의 공통적인 특징은 내부 고정자 권선에서 층간단락흔이 식별되는 상태로서, 이러한 층간단락흔은 연소 확대 과정에서 외부 화염에 의해서는

Figure 2. Composition of single-phase induction motor.

(a) Equivalent circuit

(b) Phasor diagram

Figure 3. Equivalent circuit and phasor diagram of capacitor start motor.

Figure 1. Schematic diagram of electro-mechanical energy conversion.

(a) Electric fan motor

(b) Zoom in arc mark of power wire

(c) Stator and stator winding

(d) Zoom in interlayer arc mark of stator winding

Figure 4. A fire case of electric fan motor.

형성되기 어려운 부분으로 현장의 연소형상이 전동기를 중심으로 연소 확대된 모습이 확인된다면 전동기 내부의 층간단락 형성 과정 또는 고정자 권선에서의 과열 등으로 화재가 발생한 것으로 판단할 수 있다. 이러한 고정자 권선의 과열이나 층간단락현의 형성은 전동기가 원활하게 회전하지 못하는 회전불량 상태에서 과전류가 유발됨에 따라 발생하는 것으로 본 연구에서는 임의로 구속운전 조건을 만들고, 이때 전류 및 온도변화를 측정 분석함으로써 전동기

(a) Compressor motor

(b) Stator and stator winding

(c) Zoom in interlayer arc mark of stator winding

Figure 5. A fire case of compressor motor.

에서의 화재 발생 과정을 규명하고자 한다.

3. 실험장치의 구성

실험에 사용한 전동기는 Table 1에 표기된 사양의 단상 220 V, 0.75 kW 유도전동기로 무부하 상태 및 구속운전조건에서의 전류 변화 및 온도변화를 측정 분석하였으며, 총 5회에 걸쳐 실험을 수행하였다.

구속운전조건을 만들어 주기 위해 회전축에 Figure 6(a)와 같이 전자식 디스크형 제동장치를 부착하였으며, 온도 측정을 위해 J 타입의 열전대 센서를 고정자권선에 설치하였다. Figure 6(c)에 나타낸 바와 같이 외부 온도 측정에는 열화상 카메라(Ti 400, Fluke, USA)를 이용하였으며, 전압 전류의 변화는 전력분석기(DL 750, Yokogawa, Japan)를 사용하였다. 실험방법으로는 단상 유도전동기의 기본 특성 파악을 위해 1시간 동안 무부하 운전 과정에서 고정자 권선에서의 온도변화를 측정하였다. 기본 특성에 대한 평가 후, 임

Table 1. Specification of an Induction Motor

Model	KMT-01HB6
Rating	0.75 kW (1 HP) 4P
Voltage / current	220 V / 7.4 A
Start type	Capacitor-start (400 μ F)
Insulation class	B (130 $^{\circ}$ C)
Baring	6205ZZ / 6203ZZ
Impedance	Rs 5.54 Ω , Ls 8.78 mH, Cp 286 μ F

(a) A motor used for experiment

(b) A disk type brake

(c) Photograph of experiment setups

Figure 6. Experiment setups for temperature, voltage and current of single-phase induction motor.

의로 회전이 완전히 멈춘 상태의 구속운전조건을 모의하고, 이때 고정자 권선의 전류 및 온도변화를 측정 분석하였다.

또한 외부화염을 인가하였을 때 고정자권선에서의 온도 변화 측정 및 층간단락 형성 여부에 대한 확인을 위하여 Figure 7과 같이 무부하 운전 중인 전동기에 3가지 조건으로 외부화염의 근접을 모의하였다. 첫 번째는 가스토치를 이용하여 국부적으로 전동기 외함을 가열시키는 조건이고,

(a) Gas torch

(b) Side flame

(c) Whole flame

Figure 7. Experiment condition of external flame.

두 번째는 전원 인입단 반대편에 실제 화염을 공급하는 조건이며, 마지막으로 하단부에서 전체적으로 화염이 접근하는 조건으로 외부화염을 인가하였다. 실험방법으로는 기본적으로 1 h 동안 외부화염을 인가하는 조건이며, 화재 발생 또는 전기적 특이점이 형성되어 전원이 차단되는 경우 실험을 종료하고 특이점에 대한 분석을 수행하였다. 실험 과정에서 고정자권선의 온도변화를 지속적으로 확인하였다.

4. 실험결과

4.1 무부하 운전 상태

단상 유도전동기의 무부하 기동 초기에는 회전자의 관성을 이겨내기 위한 돌입전류가 발생하며, 정상 회전속도에 이르면 정상 운전전류가 흐르는 모습을 나타낸다. 초기 기동 시, 나타나는 돌입전류의 크기는 Figure 8에 나타낸 바와 같이 약 61 A(최대값)로 측정되었으며, 정상 회전속도에 도달하는 경우 정상 운전전류 7.78 A(최대값)가 된다.

Figure 8. Waveforms of voltage and current at the initial start single-phase induction motor.

Figure 10. Waveforms of voltage and current under locked-rotor condition.

(a) Temperature change of stator winding

(b) Temperature of external frame

Figure 9. Temperature change of stator winding under normal operating condition.

(a) Temperature change of stator winding

(b) Temperature of external frame

Figure 11. Temperature change of stator winding under locked-rotor condition.

초기 기동 이후, 1시간 동안 지속적으로 무부하 운전하는 경우, Figure 9(a)와 같이 고정자권선의 온도는 완만히 상승하는 모습을 보이며, 최대 약 53 °C까지 온도가 상승하는 것으로 측정되었다. 이때 전동기 외함의 온도는 Figure 9(b)와 같이 약 20 °C 내외로 주변온도와 비슷한 온도분포를 나타내는데 이는 정상운전조건에서는 전동기 내부의 특이 과열 현상 등은 발생되지 않는 것으로 볼 수 있다.

4.2 구속운전조건

Figure 10은 전동기의 회전이 발생되지 않는 구속운전조건을 구현한 결과로써, 이때 고정자권선에 흐르는 전류는

43 A로 측정되었다. 이는 초기 기동 시 나타나는 돌입전류 61 A보다 적은 크기이지만 정상 운전전류에 비해 약 5.5배 큰 값으로 고정자 권선에서 상당한 전기적 발열을 유발할 수 있는 크기이다. 즉, 줄열의 법칙에 의해 정상 운전전류에서의 발열량에 비해 최소 30배 이상 높은 열이 발생할 수 있는 조건이다.

구속운전조건이 지속되는 경우, Figure 11에 나타낸 바와 같이 고정자권선의 온도는 급격하게 상승하는 모습을 나타내며, 약 300 °C 범위에서 연기 발생 및 화재로 이어지는 모습을 나타낸다. 화재 발생 직전 고정자권선의 온도가 300 °C에 이를 때까지의 시간은 약 2 min 30 s이며, 이때 전

(a) Smoke generation after 145 seconds

(b) Ignition after 150 seconds

(c) Combustion expansion

Figure 12. Fire process under locked-rotor condition of single-phase induction motor.

동기 외함의 온도는 약 100 °C까지 상승하는 모습을 나타내고 있다.

Figure 12는 구속운전조건에서의 화재발생과정을 나타낸 것이다. 구속운전조건에서 전동기 내부 고정자권선의 온도가 급격히 상승하면서 연기가 발생하고, 연기 발생 후 10 s 이내에 화염이 식별되면서 발화되었다. 그 후 고정자권선의 절연물 등을 매개로 연소 확대되는 모습을 나타내었다. 또한, 연소 확대 과정이 지속되는 경우, 기동용으로 설치된 콘덴서가 손상되어 전해액이 누출되면서 전해액을 매개로 화염이 확대되는 경향을 나타내었다.

화재 발생 이후 전동기에 대한 분해 검사 결과, Figure 13과 같이 내부 고정자권선의 절연물이 주로 연소되면서 권선 표면에 그을음 부착 및 열변색 흔적이 남아 있으며, 수 개소에서 층간단락흔이 식별되었다.

층간단락 형성과정에서는 고정자 권선에서 특징적인 전압, 전류의 변화는 관찰되지 않았는데 이는 층간단락이 발생되더라도 고정자 권선의 임피던스가 크게 변화하지 않기

(a) Stator winding

(b) Zoom in interlayer arc mark of stator winding

Figure 13. Interlayer arc marks of stator winding under locked-rotor condition.

때문인 것으로 생각된다.

고정자 권선에서 나타나는 층간단락흔의 흔적은 총 5회의 실험에서 모두 동일한 양상으로 나타났으며, 고정자 권선이 과열되면서 연기 및 화재가 발생하고, 이와 동시에 층간단락흔이 형성되는 것으로 판단된다.

따라서 화재원인에 대한 조사과정에서 현장의 연소형상이 전동기를 중심으로 연소 확대된 모습이고, 전동기 고정자 권선에서 층간단락흔이 식별된다면 전동기 고정자권선의 과열 및 절연과괴 과정에서 최초 화재가 발생한 것으로 판단할 수 있을 것이다.

4.3 외부화염 인가 상태

3가지 조건의 외부화염 인가 실험 중, 첫 번째 가스토치를 이용하여 전동기 외함을 가열하는 상태에서는 Figure 14에 나타난 바와 같이 정상적인 운전조건과 유사한 온도변화를 나타내는데 최대 온도는 약 56 °C로 측정되었다.

또한 고정자권선 및 전원배선 등에서 어떠한 전기적 특이점 형성이나 변화도 나타나지 않는 것으로 확인되었다.

두 번째로 측면에서 실제 외부화염을 인가하는 경우, Figure 15와 같이 고정자권선의 온도는 지속적으로 상승하는 양상을 나타내며, 최대 온도는 약 139 °C로 측정되었다.

화염 인가 후, 31 min 23 s가 되는 시점에서 전원선을 연결한 접속 나사 부분에서 단락이 발생되면서 전원이 차단되었다. 실험 후, 전동기 내부 고정자권선 및 회전자 부분에 대한 검사 시, Figure 16에 나타난 바와 같이 고정자권선은 전반적으로 그을린 상태이고, 고정자 철심 및 회전자 부

Figure 14. Temperature change of stator winding under applied gas torch.

Figure 15. Temperature change of stator winding under applied side flame.

분에서 마찰 흔적이 식별되는 모습이며, 고정자권선에서 층간단락 등의 전기적 특이점은 관찰되지 않았다.

세 번째로 하단에서부터 전동기에 전체적으로 화염이 인가되는 경우, Figure 17과 같이 고정자권선의 온도는 급격히 상승하는 모습이며, 최대온도는 약 203 °C로 측정되었다.

화염 인가 후, 5 min 21 s가 되는 시점에서 Figure 18에 나타난 바와 같이 전원배선에 단락이 발생되면서 전원이 차단되는 모습이었다. 전동기에 대한 분해 검사 시, 고정자권선은 전반적으로 그을린 상태이며, 고정자권선 및 회전자 등에서는 층간단락과 같은 전기적 특이점이나 마찰 흔적 등은 발생되지 않았다.

앞서 기술한 바와 같이 국부적으로 외부화염을 인가하는 경우에는 정상적인 운전 조건과 유사한 온도변화를 나타내었으며, 아무런 전기적 특이점도 발생되지 않았다. 또한 전반적인 화염 분위기에서는 전원배선 및 접속 단자 등에서 먼저 단락이 발생되면서 전원이 차단되는 모습이며, 고정자권선에서 층간단락은 발생되지 않음을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 단상 유도전동기를 대상으로 회전불량 상태를 가정하여 임의로 회전이 되지 않는 구속운전조건 상태를 구현하고 이때 고정자 권선에서의 온도변화 및 화

(a) Stator and rotor

(b) Friction marks of stator

(c) Arc marks of connection screw

Figure 16. Disassembled stator and rotor under applied side flame.

Figure 17. Temperature change of stator winding under applied whole flame.

재로 진전하는 양상을 분석하였으며 다음과 같은 결과를 얻었다.

먼저 구속운전조건에서는 정상 운전전류에 비해 약 5.5 배 큰 과전류가 발생되고, 이 과전류에 의해 내부 고정자권

(a) Stator and rotor

(b) Arc marks of power cord

Figure 18. Disassembled stator and rotor under applied whole flame.

선의 온도가 급격히 상승하는 것으로 확인되었다.

고정자권선의 온도가 급격히 상승하면서 약 300 °C 정도에 이르면 연기가 발생하고, 연기 발생 후 10 s 이내에 화재로 이어지는 모습을 나타내었다. 이때 전동기 금속 외함의 온도는 100 °C 이상의 온도를 나타내는데 전동기 금속 외함의 온도 변화만으로도 내부 과열 여부를 추정해 볼 수 있을 것으로 생각된다.

화재 발생 이후 고정자 권선에서는 층간단락흔이 식별되는 모습으로 고정자 권선 과열 및 층간단락 형성과정에서 화재가 발생하는 것으로 볼 수 있으며, 고정자 권선에서 층간단락흔의 식별은 전동기 내부에서 화재가 발생하였다는 것을 입증할 수 있는 흔적으로 판단된다.

향후에는 실제 부하상태를 모의하여 고정자 권선 및 금속 외함의 온도 변화를 분석하는 것으로 화재 발생 이전의

특이 변화를 찾아냄으로써 화재 예방 및 진단 기준을 마련할 수 있는 연구를 진행하고자 한다.

후 기

이 논문은 행정안전부 주관 국립과학수사연구원 중장기 과학수사감정기법연구개발(R&D)사업의 지원을 받아 수행한 연구임(NFS2020FSA02).

References

1. National Fire Data System Korea, "2019 Fire Statistics", <http://www.nfds.go.kr> (2019).
2. NFPA 921, "Guide for Fire and Explosion Investigation", 2008 Edition, National Fire Protection Association, pp. 189-200 (2008).
3. C. H. Lee, K. J. Ok and B. D. Kwon, "A Study on the Fire Cause Analysis of Motor Damage", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 21, No. 4, pp. 59-64 (2007).
4. S. H. Choi, D. K. Kwak and J. H. Kim, "A Study on Device Development for Electrical Fire Protection on Open Phase of Three-Phase Motor", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol. 26, No. 1, pp. 61-67 (2012).
5. Y. B. Kim and D. H. Kim, "Analysis on the Voltage, Current and Temperature Signals for Free and Operation of Three Speed Electric Fan", Fire Science and Engineering, Vol. 28, No. 3, pp. 87-91 (2014).
6. J. Y. Song, B. S. Moon, Y. J. Cho, J. P. Kim and N. K. Park, "An Experimental Study on Ignition Mechanism of a Single Phase Induction Motor", Proceedings of 2019 Fall Conference, Korean Society of Safety, p. 132 (2019).
7. P. C. Sen, "Principles of Electric Machines and Power Electronics", John Wiley & Sons Ltd., Chichester, UK (2015).