

고압전동기의 전기·기계적 결합 경보 시스템에 대한 연구

김인욱*, 이정구*, 손영득*

*한국기술교육대학교 기계설비제어공학과

e-mail: iwkim16@iwest.co.kr, soesanrjk@koreatech.ac.kr, ydson@koreatech.ac.kr

A Study on the Alarming System for Electrical and Mechanical Faults of HV-Motor

In-Wook Kim*, Jeong-Ku Lee*, Yung-Deug Son*

*Dept. of Mechanical Facility Control Engineering

요약

모든 회전기는 열과 환경 스트레스 및 전기적·기계적 손상과 같은 여러 가지 악조건에 노출되어 있으므로 많은 주의가 요구된다. 또한, 전동기는 산업 공정에서 핵심 자산이므로 운전 중 고장을 최소화하는 솔루션을 찾는 것이 필수적이며 운전 중 전기·기계적 결합 상태를 검출하여 예비 전동기를 가동, 결함이 있는 전동기를 유지·보수하여 고장을 예방할 필요가 있다. 그러므로 전기적·기계적 이상 상태를 상시 모니터링하고 분석 정보를 제공함으로써 정비시간 단축과 불필요한 과다정비를 줄일 수 있다. 이러한 효율적이고 경제적인 전동기 운영을 위해 본 논문에서는 전동기 운전 중 기계적 결함과 전기적인 결연상태 결함을 검출하여 주의, 위험 등의 조기 경보를 발생시키는 H/W 및 S/W 시스템 개발을 하고 제작 및 현장 시운전을 통해 결합 데이터 측정 확보에 드는 시간과 경비를 절감, 고장예방 효과를 증대 하고자 한다.

1. 서론

발전소에 사용되는 유도 전동기는 매우 신뢰성이 높고 고비용으로 대기 상태 없이 운전이 이뤄지고 있다. 연속 운전 중 예상치 못한 정전 횟수를 줄이기 위해 이러한 전동기에 많은 예측 기술이 적용된다. 전동기의 고장 탐지에 적용되는 기강 일반적인 기술은 진동 분석, 음향 분석, 속도 변동, 부분 방전(PD:Partial Discharge), 회로 분석 등이 있다. 기계적 개념을 기반으로 한 분석 기술은 확립되었지만, 전기적 특성 분석을 기반으로 한 기술은 최근에서야 도입되고 있다. 예측 기술에 대한 수요가 증가함에 따라 전기적 특성 분석(ESA: Electronic Signature Analysis) 기술이 산업계에 관심을 불러일으키고 있다. ESA는 전동기 전류특성 분석 (MCSA: Motor Current Signature Analysis), 확장된 Park's 벡터 접근법 (EPVA:Extended Park's Vector Approach) 및 순시 전력 특성 분석 (IPSA:Instantaneous Power Signature Analysis) 등을 포함하는 것이다.

2. 본론

2.1 순시 전력 특성 분석(IPSA)

순시 전력 분석은 스펙트럼 분석에 기반한 것으로 하나의 고장 분석 기술이다. 이 기술과 MCSA 및 VSA의 가장 큰 차

이점은 전동기 위상의 전압 및 전류 신호에 동시에 존재하는 정보를 고려하여 복조된 결합 요소를 특정 주파수로 표현 한 것이다. 이상적인 3상 시스템을 고려할 때 순시 전력 $p(t)$ 는 식 (1)과 같다. 다음과 같이 주어진다. 고장이 없는 정상상태로 운전되는 전동기는 식 (2), (3), (4)와 같다.

$$p(t) = v_{LL}(t)i_L(t) \quad (1)$$

$$v_{LL}(t) = \sqrt{2} V_{LL} \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$i_{L,0}(t) = \sqrt{2} I_L \cos(\omega t - \varphi - \frac{\pi}{6}) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} p_0 &= v_{LL}(t)i_{L,0}(t) \\ &= V_{LL}I_L \left[\cos(2\omega t - \varphi - \frac{\pi}{6}) + \cos(\varphi + \frac{\pi}{6}) \right] \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 v_{LL} 은 선간 전압, $i_{L,0}$ 은 상전류, ω 는 각 주파수이고 φ 는 부하의 위상각이다.

동력 전달 계통에 기계적 결함이 있는 경우 속도와 슬립의 급증이 수반되는 전동기 토크 진동이 나타나고 이것은 전류 스펙트럼에서 변조가 발생한다. 변조된 전류는 식 (5)와 같다.

$$i_L = i_{L,0}(t) [1 + M \cos(\omega_f t)] \quad (5)$$

$$= i_{L,0}(t) + \frac{MI_L}{\sqrt{2}} \left[\cos \left[(\omega + \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + \cos \left[(\omega - \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] \right]$$

여기서 M 은 지수 변조, ω_f 는 고장주파수이다.

이 때 순시 전력은 식 (6)과 같으며 기본파 성분 $2\omega/2\pi$ 와 $(2\omega$

$\pm\omega_f/2\pi$ 에서의 측 대역 외에, 순시 전력의 스펙트럼은 고장으로 인한 변조와 직접적으로 관련된 추가 성분(Characteristic component)을 포함된다. 이 성분을 이용하여 전동기 상태 진단을 위한 정보로 활용된다.

$$p(t) = p_0(t) + \frac{MV_{LL}I_L}{2} \left\{ \cos \left[(2\omega + \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + \cos \left[(2\omega - \omega_f)t - \varphi - \frac{\pi}{6} \right] + 2 \cos(\varphi + \frac{\varphi}{6}) \cos(\omega_f t) \right\} \quad (6)$$

2.2 전동기 고장 시뮬레이터

현장에서 기계적 결함이 있는 전동기를 발견하여 전기적 신호를 취득하는 것은 매우 어려우므로 전동기의 기계적 결함을 인위적으로 발생 시킬 수 있는 장비를 그림 1과 같이 제작하였다. 저압 유도 전동기 형태의 전동기 고장 시뮬레이터는 각종 전동기 결함과 기계 결함을 한 대의 시뮬레이터를 통해 실험할 수 있도록 구성하였으며 사양은 표 1과 같다. 전동기의 다양한 결함을 시험하기 위해 전동기 교체가 가능하도록 하였으며, 전동기 교환 시 시험 조건이 변경되는 것을 최소화 하여 동일한 조건에서 데이터를 취득할 수 있도록 설계하였다.



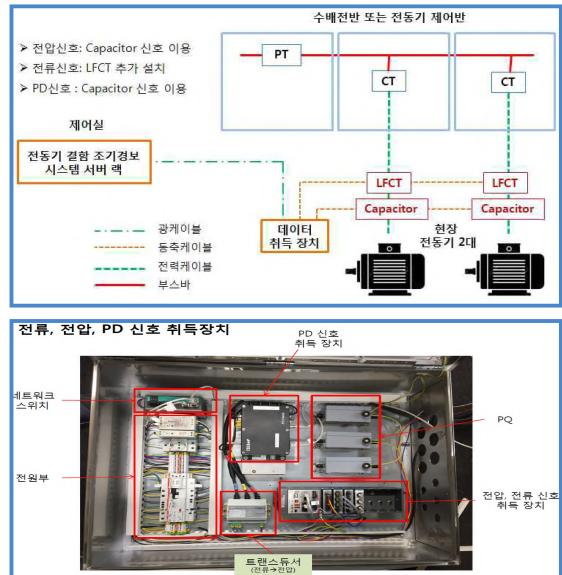
[그림 1] 전동기 고장 시뮬레이터

[표 1] 전동기 고장 시뮬레이터 사양

구분	브레이크 사양
전동기	1 HP(0.75 W) 3상 AC 전동기
컨트롤러	1.5 HP 엘타 VFD-M 인버터
최대 전동기 RPM	6,000 (단시간)
RPM 범위	0 to 6,000 RPM 가변
전압	구동 입력 380 VAC, 단상 및 380 V 3상 4선식
주파수	50/60 Hz
전류 센서	1 mA/A 감도의 CT
사프트	17 mm 직경, 스틸
베어링	정상 베어링 2 개(UC203)
페데스탈	유니트 베어링, 수직, 수평, 축방향 센서 설치를 위한 1/4-28UNF 텁
회전자	152 Φ 알루미늄 로터
디스플레이	RPM 지시 - 7 Segment LED 디스플레이 전류값 지시 - 7 Segment LED 디스플레이
무게	약 100 kg
차수	1000 * 360 * 500 (W * H * D)

2.3 전기·기계적 결합 경보 시스템

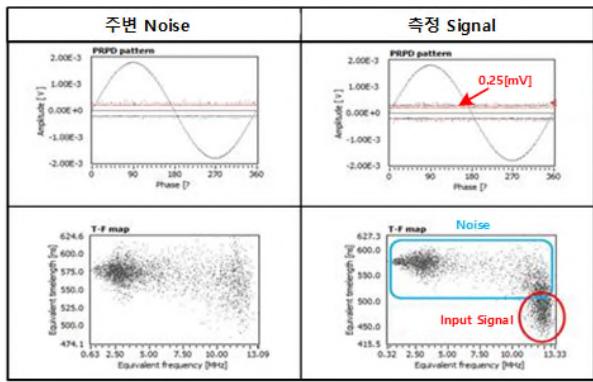
지금까지 회전기기의 유지보수는 일상순시와 정기 점검에 의하여 불량개소를 발견하고 보수하는 일정 주기에 따른 예방보전을 하였으나, 최근 경제적인 유지보수와 신뢰성 있는 설비유지를 위하여 회전 기기의 상태를 점검하여 정비하는 상태점검으로 전환하고 있다. 경보 시스템은 회전기의 운전 상태에서 이상 징후를 상시 감시하여 불시 고장을 방지하며, 축적된 데이터로 최적의 유지보수 계획을 수립하고, 고장 시 누적된 데이터로 이상원인 및 이상위치를 판정하여 신속한 사고 복구를 위한 시스템이다. 시스템은 기계적 결합 검출 시스템과 전기적 결합 검출 시스템으로 나눠진다. 기계적 결합 검출은 전동기 단자함에 설치한 전류센서에서 전류신호를 취득하고, 현장에 설치된 Local Unit 내부의 PD 측정 임피던스 모듈을 통해 취득된 데이터 중 저주파 대역의 신호로부터 전압을 측정한다. 측정된 전압·전류 데이터는 전압 및 전류 취득 장치를 통해 수집된다. 전기적 결합 검출은 전동기 단자함에 설치한 커플링 커패시터를 통해 취득된 신호에서 PD 측정 임피던스 모듈을 거쳐 통과한 고주파 출력신호를 PD 신호 검출용으로 사용한다. 측정된 PD 신호는 PD 신호 취득 장치를 통해 데이터가 저장된다.



[그림 2] 전기·기계적 결합 경보 시스템

2.4 결합 경보 시스템의 부분방전(PD) 시험

전동기의 고장 및 절연상태 등을 PD 시험을 통해 PRPD (Phase Resolved Partial Discharge) 패턴, T-F Map을 통해 파악 할 수 있다. 그림 3은 PD 신호 검출 한도시험(Direct방식)의 결과를 나타내었다. 시험은 교정기를 통해 측정 장비에 5pC의 신호를 인가하여 인가한 신호가 다른 노이즈 신호와 구별하여 측정 가능 여부 확인하는 것이다. 이 때 인가한 신호는 5 [pC], 측정값은 0.25 [mV]로 노이즈 신호와 인가한 신호의 구분이 확인된다.

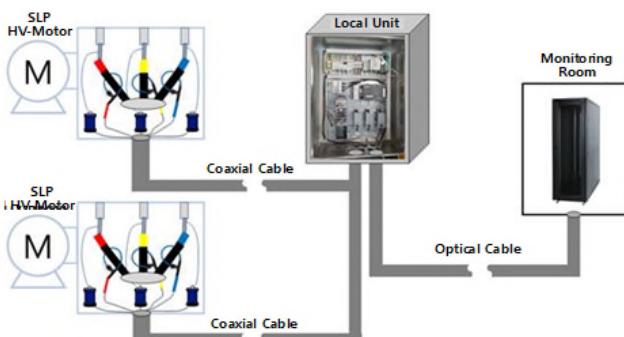


[그림 3] PD 신호 검출 한도시험

이 때 인가한 신호는 5 [pC], 측정값은 0.25 [mV]로 노이즈 신호와 인가한 신호의 구분이 확인된다.

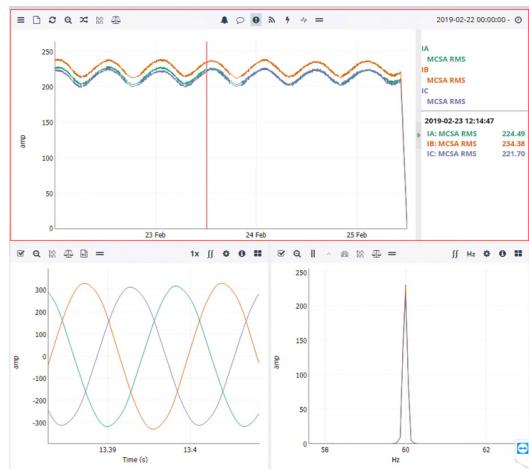
2.5 결함 경보 시스템의 현장 설치 및 시험

경보 시스템은 화력발전소 SLP(Sea Water Lift Pump) 고압전동기에 설치하여 시험하였다. 시험을 위한 회로 구성은 그림 4와 같으며 SLP전동기 단자함 각각에 PD 신호 및 전류신호를 취득하기 위한 커플링 커패시터와 로고스키 코일을 설치하였다. 또한, 데이터 취득을 위해 동축케이블 및 광케이블을 사용하여 Local Unit, Monitoring Room에 연결하였다.



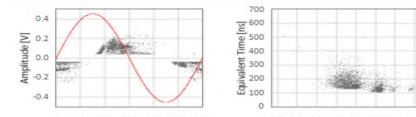
[그림 4] 현장 설치 구성도

전기·기계적 결함을 위해 현장에서 SLP전동기에 3일 정도의 일정기간 시험 운전하였다. 기계적 결합 검출을 전류신호 특성 시험을 하였으며 그림 5에 U, V, W상 전류 신호 특성 분석을 나타내었으며 U, V, W 상의 전류값은 224.49 [A], 234.38 [A], 221.70 [A]로 최대 부하 전류 238 [A]미만의 값을 나타냈다. 전기적 결합 검출을 위해 그림 6과 같이 PD 방전 신호 분석하였으며 표 2와 같은 결과를 얻었다. SLP전동기의 PD 방전 진단 결과 U, V 상에서 내부방전 형태의 PD 방전 신호가 검출되었다. U상과 V상의 PD 방전 크기를 비교하면 U상에서 더 큰 신호가 검출 되었고, U상과 V상의 부분 방전 신호의 위상이 서로 반대로 극성으로 나타난 것을 확인할 수 있다. 이를 통해서 U상에서 발생한 내부 방전 신호가 접지선을 통해 V상으로 유기되었을 것으로 추정한다.

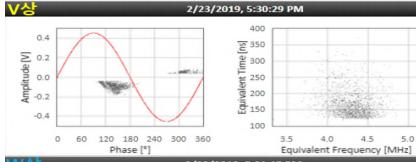


[그림 5] U, V, W상 전류 신호 특성 분석

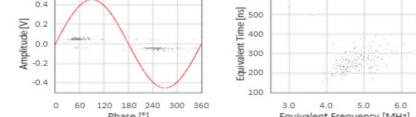
U상 2/23/2019, 5:29:42 PM



V상 2/23/2019, 5:30:29 PM



W상 2/23/2019, 5:31:15 PM

[그림 4] PD 방전 신호 분석
[표 1] 전동기 고장 시뮬레이터 사양

구 분	U상	V상	W상
크 기	210 [mV]	190 [mV]	55 [mV]
주파수	3.5~6.1 [MHz]	3.6~4.8 [MHz]	4.1~5.9 [MHz]
폐 턴	내부방전	내부방전	노이즈

3. 결론

본 논문에서 제안하는 경보시스템은 전류와 전압을 인가 받아 신호 처리하는 방법으로 회전기의 상태와 결함을 분석, 진단, 경향 관리하는 것이다. 또한, 발전 정지 없이 운전 중에도 진단이 가능하며 활선 진단 방법 중 고정자 권선에서 직접 부분방전을 측정하는 방법이다. 시뮬레이터와 현장의 회전기에서 발생한 PRPD 패턴 등을 확인하였고 현장 SLP 전동기에서 PD 진단을 수행하면서 노이즈와 PD 신호를 효과적으로 분석을 용이하게 할 수 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Rui Araujo, "Predictive Maintenance by Electrical Signature Analysis to Induction Motors", INTECH 2012 .
- [1] 김광진, 한천, "진동 및 전류신호의 데이터융합을 이용한 유도전동기의 결함진단", 한국소음진동공학회논문집, 제14권 11호, pp. 1091-1100, 11월, 2004년.