

디지털보호계전시스템을 활용한 모터고장진단에 관한 연구

° 이성환*, 김보연*, 이동영*, 장낙원**

* 위덕대학교 에너지전기공학부 ** 국립해양대학교 전기전자공학부

A Study on the Motor Fault Diagnosis using a Digital Protective Relay System

° Sunghwan Lee*, Boyeon Kim*, Dongyoung Yi*, Nakwon Jang**

* Uiduk University ** Korea Maritime University

Abstract - In this paper, we will treat the diagnosis problem to accurately determine fault types. The judgement of fault types is accomplished by observing the cluster newly formed with faults and clustering the input current waveforms to intrinsically show the conditions with the dignet that is a clustering algorithm. The types of input current waveforms are, however, constrained during normal operation, though it considers the load character. In case of faults, new clusters are generated outside the clusters, which appear during normal operation, because the input current waveforms of the induction motor are generated by the type which is not observed in case of faults. The diagnosis about the types of faults is essential to building a fault tree about the induction motor, and it removes the causes of the faults using a fuzzy logic. We, first, constitute a fault tree, which connects with the parts and the entire system of the induction motor, and investigate fault modes which can be generated from the fault tree and the relationship of the cause and the effect of each part (of the motor). Also, we distinguish the faults of each part by means of inducing the said of fuzzy relation equations encapsulating the relationship of the fault modes and each part.

1. 서 론

최근 전력 수요의 증대와 함께 중, 대형 수용가의 전력 시스템이 점차 복잡화, 다양화, 대용량화되었다. 특히 전동기는 전기에너지를 기계적 에너지로 변환하는 원동기로서, 전 분야에 걸쳐 널리 사용되고 있으며, 전체 전력 사용량의 많은 부분을 차지하고 있다. 특히, 유도전동기의 경우, 강건한 설계와 제조로 이미 산업 전반에서 널리 성공적으로 사용되고 있다. 그러나, 고장이 발생하였을 때, 이를 적시에 발견하지 못한 채 방치하는 경우, 유도전동기 뿐 만 아니라 전력 계통의 마비까지도 야기할 수도 있으며, 전동기 고장에 대비하기 위한 여분의 설비를 준비해야 할 수도 있다. 이는 시스템의 전체적인 신뢰도를 떨어뜨리고, 복구를 위한 추가 인력, 재정, 및 시간의 손실을 초래한다. 그러므로 이를 보다 신속하고 신뢰성 있게 운전하며 보호하는 모터보호 계전기 및 이를 이용한 원격감시제어 시스템이 크게 부추고 현장 유지보수의 편의성을 통한 인력 절감의 효과가 일련 수용가에서는 더욱 중요해짐에 따라 보다 고도화되고 자동화된 디지털 타입의 모터 보호계전기를 이용한 전력 감시제어 시스템이 절실히 요구된다(1 - 4).

2. 디지털보호계전시스템

전력설비/각종기기의 상황 및 제어, DATA을 위한 현장용 중앙감시 시스템으로서 디지털 단말 유니트들과 통신으로 연결됨으로써 종합적인 보호/제어/감시가 가능하며 다양한 메뉴화면의 운용 및 데이터 관리를 통해 현장에서 최적의 전력설비 운영을 지원하는 시스템이다. 디지털 계전기, 전자식 배전반 등과 같이 디지털화 및 지능화되어 있는 유니트들로 구성되어 있고, 전력설비의 보호기능을 수행한다. 디지털보호계전시스템의 전체적인 구성은 그림 1과 같다. 크게 단말 유니트인 디지털 계전기, 상위 HOST 시스템인 중앙 감시부, 그리고 하위 단말 유니트와 상위 HOST 시스템을 연결해주는 통신제어장치로 구성되어 있다. 단말 유니트의 전력요소별 처리장치인 T/D (Transducer), 전기기기계측 계전기 등이 디지털 계전기, 전자식 배전반등과 같이 디지털화, 지능화 되어 있고, 이들 단말 유니트들은 표준 통신방식(RS485)을 이용하여 전력감시제어 시스템에서 자체적으로 데이터 관리가 이루어지도록 하였고, HMI(HUMAN MACHINE INTERFACE) 기능을 가지고 있으므로 각종 데이터의 입/출력 상황과 사고 상태를 확인할 수 있다. 또한 실시간으로 데이터의 저장이 이루어지고 수집된 데이터는 범용의 통신방식(IEEE802.3/Ethernet)을 통해 통신제어장치와 HOST 시스템 간에 실시간 전송 처리가 이루어 진다.

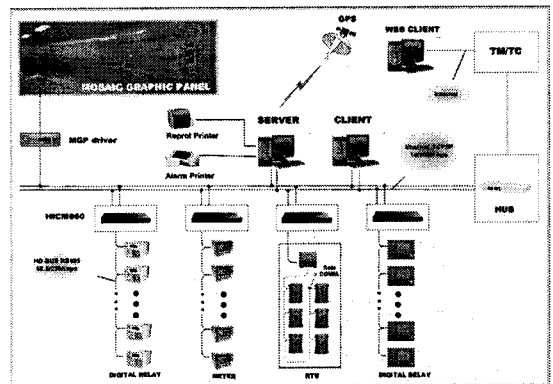


그림 1. 디지털보호계전시스템 구성도

3. 모터고장진단

유도전동기 고장 검출과 고장 원인을 진단하기 위한 과정을 전체적으로 살펴보면 그림 2.와 같다.

3.1 모터고장검출

전동기가 정상적으로 동작하는 경우 일정한 동작을

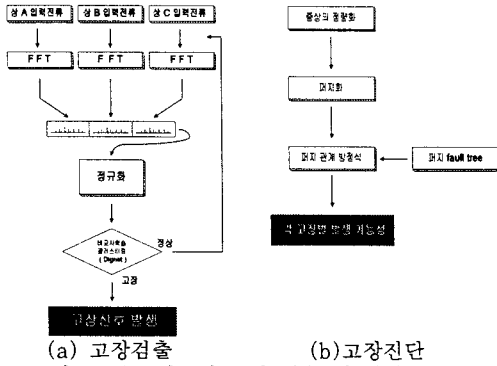


그림 2. 유도전동기 고장 검출 및 진단 과정

주기적으로 반복하는 경우가 일반적이므로, 부하의 특성은 알 수 없으나, 부하 특성에 의해 나타나는 전동기 입력 전류의 파형은 한정된 유형이 주기적으로 나타나는 것으로 생각할 수 있다. 따라서, 정상 운전 상태에선 입력 전류의 주파수 해석 결과를 클러스터링하면, 입력 전류에 어느 정도의 외란이 포함된다 하더라도 비슷한 유형들로 이루어진 클러스터들이 한정된 갯수로 생겨날 것이다. 그러나, 몇개의 클러스터가 생겨날 것이지는 유도전동기가 수행하게된 작업 내용에 대한 정확한 정보가 없다는 것을 가정하였으므로 알 수 없다. 따라서, 주파수 해석결과를 자율적으로 클러스터링 해 줄 수 있는 알고리즘이 필요하다. 이러한 방법의 하나로 비교사 학습 클러스터링을 사용할 수 있다. 입력전류의 주파수 스펙트럼의 클러스터링을 위하여 Thomopoulos 등이 제안한 Dignet을 이용하였다. Dignet은 자기 구성 능력과 빠른 학습시간, 그리고 파라미터 설정이 용이한 특징을 갖고 있다.

3.2 모터 고장진단

퍼지 고장 진단을 위한 방법으로서 Gmytrasiewicz 등이 제안한 퍼지 Fault Tree[5]를 이용하였다. 즉, fault tree는 시스템에서 발생하게 되는 사고의 모델을 나타내며, 시스템 각 요소들의 고장과 관찰되는 증상간의 관계를 체계적으로 해석하기 위한 방법으로서 시스템의 각 부분간의 고장에 의한 연관성을 규정한다. 그러나, 기존에 사용되어 왔던 fault tree의 전형적인 방법은 기본적 고장들에 대한 고장확률로부터 시스템 전체의 고장확률을 얻게 되어있다. 그러나, 과거 고장의 빈도로부터 기본적 사고에 대한 확률을 구하는 것은 어려울 뿐만 아니라, 시스템의 환경이 동적으로 변화하므로 과거의 운전 기록으로 정확한 확률을 구할 수 없다. 따라서, 고장에 대한 부정확한 확률에 의해 발생하는 시스템 신뢰도 분석의 어려움을 덜기 위해 사고에 대한 상대적 빈도인 확률을 퍼지 수로 표현되는 가능성(possibility)으로 간주할 수 있다.

고장 유형들과 전동기 운전 상태의 관계를 나타내는 fault tree를 구성은 그림 3.과 같다.

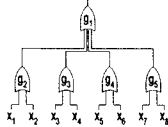


그림 3. 유도전동기 고장 진단을 위한 fault tree

- g1 : 시스템으로서의 전동기 고장 가능성
- g2 : 공극 이상 발생 가능성
- g3 : 상 A의 고장 가능성
- g4 : 상 B의 고장 가능성
- g5 : 상 C의 고장 가능성
- x1 : 회전자 권선 손상 가능성
- x2 : 베어링 고장 가능성
- x3 : 상 A 불평형 가능성
- x4 : 상 A 결상 가능성
- x5 : 상 B 불평형 가능성
- x6 : 상 B 결상 가능성
- x7 : 상 C 불평형 가능성
- x8 : 상 C 결상 가능성

이며, 각 단계에서의 정량화가 가능한 증상들과 그들의 정량화는 다음과 같다.

(1) 공극 이상 발생과 각 상 고장 발생의 구별

임의 상에 고장이 발생하는 경우, 삼상간의 평형이 깨져, 입력 전류의 크기가 가장 큰 상과 입력 전류의 크기가 가장 작은 상간의 전원 주파수대에서의 성분 크기가 커지게된다. 그러나, 공극 이상 발생의 경우, 전원 주파수 이외의 주파수대에서 고장 증상이 각 상에 동일하게 나타나므로 전원 주파수 성분이 거의 평형을 이룬다. 즉,

$$g2 = (p_{max} - p_{min})$$

$$p_{max} = \max(p_{Af=60Hz}, p_{Bf=60Hz}, p_{Cf=60Hz}) \quad (1)$$

$$p_{min} = \min(p_{Af=60Hz}, p_{Bf=60Hz}, p_{Cf=60Hz})$$

의 값이 공극 이상 발생의 경우 매우 작고, 상 고장이 발생한 경우 이 값이 매우 크다

(2) 각 상 고장 발생시 고장 발생 상의 구별

상 전류의 크기 변화가 클 수록 고장의 가능성이 크므로 식(3-10)과 같이 정량화할 수 있다.

$$\frac{|p_{if=60Hz}(t) - p_{if=60Hz}(t-t_0)|}{\sum_{i=A,B,C} |p_{if=60Hz}(t) - p_{if=60Hz}(t-t_0)|} \quad (2)$$

여기서 $p_{if=60Hz}(t-t_0)$: 고장 검출 t_0 전 상 전류

(3) 공극 이상 발생시 회전자 권선 손상과 베어링 고장의 구별 고장 시뮬레이션결과에 의하면 전원 주파수 이외의 주파수대에서 발생하는 성분들의 합을 살펴보면 베어링 고장의 경우가 더 작게 나오는 것을 알 수 있다. 이로부터 베어링 고장시 증상을 정량화하면 다음과 같다.

$$\frac{\sum_{f=0}^{nyquist\ freq} p_f(\text{전원 주파수 성분 제외})}{\sum_{f=0}^{nyquist\ freq} p_f}$$

$$p_f = p_f \text{ if } p_f \geq TH$$

$$\text{if } p_f < TH$$

$$\text{여기서 } p_f = \text{주파수 } f \text{에서의 파워} \quad (3)$$

TH = 유효한 스펙트럼 성분을 거르기 위한 문턱 값, 전원 주파수를 제외한 스펙트럼 성분들의 평균

(4) 상 고장 발생시 상 불평형과 결상의 구별

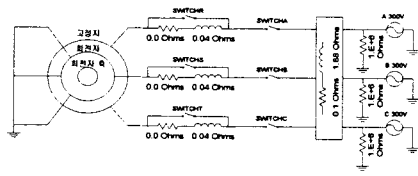
결상의 경우, 전원 공급의 차단이 일어나므로 전류량의 크기가 매우 작을 수밖에 없다.

$$\frac{p_{if=60Hz}}{\sum_{i=A,B,C} p_{if=60Hz}} \quad (4)$$

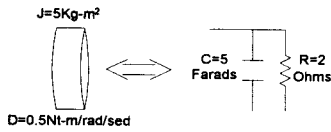
4. 시뮬레이션 및 결과 고찰

4.1 시뮬레이션 모델

유도전동기 고장 검출과 진단에 있어 회전자 권선 손상, 베어링 고장, 상 불평형을 고장 유형으로서 고려하였다. 유도전동기 고장 발생시 증상을 얻기위해 유도전동기 모델을 EMTP(Electro Magnetic Transients Program)에 의하여 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션을 위한 운전 모델의 구성과 유도전동기는 그림 4.와 같다.



(a) 전기적 부분 모델



(b) 기계적 부분 모델

그림 4. 유도전동기 운전 모델

4.2 시뮬레이션 결과

표 1. 각 고장별 진단 결과

	행렬 B								
	g1	g2	g3	g4	g5	x2	x4	x6	x8
회전자 권선 손상	0.99	0.96	0.62	0.70	0.68	0.00	0.67	0.67	0.66
베어링 고장	0.99	0.72	0.66	0.64	0.69	0.67	0.67	0.66	0.67
상 A 불평형	0.99	0.00	0.98	0.01	0.01	0.00	0.00	0.98	0.98
상 A 결상	0.99	0.00	0.98	0.02	0.03	0.00	0.98	0.00	0.00
상 A,B 불평형	0.99	0.00	0.98	0.94	0.01	0.00	0.00	0.00	0.98
상 A,B 결상	0.99	0.00	0.95	0.99	0.05	0.00	0.98	0.98	0.00

	X							
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8
회전자 권선 손상	0.97	0.0	0.63	0.67	0.70	0.67	0.68	0.66
베어링 고장	0.67	0.73	0.67	0.67	0.64	0.64	0.69	0.67
상 A 불평형	0.00	0.00	0.98	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01
상 A 결상	0.00	0.00	0.00	0.98	0.02	0.00	0.03	0.00
상 A,B 불평형	0.00	0.00	0.98	0.00	0.94	0.00	0.01	0.01
상 A,B 결상	0.00	0.00	0.14	0.96	0.56	0.98	0.05	0.05

	행렬 A									
	x1	x2	x3	x4	x5	x6	x7	x8	x3^A/x5	x4^A/x6
회전자 권선 손상	0.97	0.00	0.63	0.63	0.70	0.67	0.68	0.66	0.63	0.37
베어링 고장	0.73	0.67	0.67	0.67	0.64	0.64	0.69	0.67	0.64	0.64
상 A 불평형	0.00	0.00	0.98	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00
상 A 결상	0.00	0.00	0.98	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.02	0.00
상 A,B 불평형	0.00	0.00	0.98	0.98	0.94	0.00	0.01	0.01	0.94	0.00
상 A,B 결상	0.00	0.00	0.96	0.96	0.99	0.98	0.05	0.0	0.96	0.05

위의 표1.에서 보는 바와 같이 단일 고장이 발생한 경우, 그에 해당하는 기본적 고장 원소의 고장 가능성이 다른 기본적 고장 원소들의 고장 가능성에 비하여 큰 값을 가지는 것을 볼 수 있다. 두가지의 고장이 복합적으로 발생한 경우 해당되는 두 고장 원소들의 고장 가능성이 비슷하게 높게 나오는 것을 알 수 있다. 즉, 고장이 발생한 경우, 해당 종류의 고장 항목에서 고장 가능성이 상대적으로 높은 값으로 나타난다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 다양한 부하 환경과 용량을 가지는 유도전동기의 운전 도중 발생하는 고장을 적시에 발견하고, 고장의 원인을 진단하기 위한 알고리즘의 개발을 목적으로 하였다. 이를 위하여 본 연구에서는 유도전동기 상태 모니터링을 위한 수단으로 입력 전류의 주파수 스펙트럼을 사용하였다. 입력전류 스펙트럼의 클러스터링을 통해 고장 발생시 새로운 형태로 나타나는 스펙트럼

패턴을 감지함으로써 고장을 검출하였다. 검출된 고장의 원인을 진단하기 위해 fault tree를 구성하여 유도전동기 고장과 각 고장 유형들간의 관계를 퍼지 관계식으로 표현한 후, 그 해를 구함으로써 고장 원인을 진단하였다.

위의 결과에서 제안된 고장 검출과 진단 기법을 사용함에 있어, 유도전동기 상태 모니터링을 위한 수단으로 전동기 입력 전류만을 사용하였으나, 가속 센서, 축 코일 등의 센싱 수단을 보강함으로써, 더욱 다양한 종류의 고장을 검출하고 더욱 정밀한 진단이 가능할 것이다.

감사의 글

이 논문은 2006년도 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력연구원(R-2005-7-068) 주관으로 수행된 과제임.

[참 고 문 헌]

- [1] Drew Baigent and Ed Lebenhaft, "Microprocessor - Based Protection Relays : Design And Application Examples", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 29, No 1, pp.66 - 71, 1993.
- [2] Sam F. Farag, M.K. Jhaveri, "Intelligent Microprocessor - Based Devices Provide Advanced Motor Protection, Flexible Control, and Communication in Paper Mills", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 33, No 3, pp.840 - 847, 1997.
- [3] J. Penman, H. G. Sedding, and W. T. Fink, "Detection and Location of Interturn Short Circuits in The Stator Winding of Operation Motors", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 9, No. 4, pp.6 52 - 658, December, 1994.
- [4] Mo - yuen Chow, Peter M. Mangum, and Sui Oi Yee, "A Neural Network Approach to Real Time Condition Monitoring of Induction Motors", *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, Vol. 38, No. 6, December, pp.448 - 453, 1991.
- [5] Piotr Gmytrasiewicz, Jere A. Hassberger, and John C. Lee, "Fault Tree Based Diagnostics Using Fuzzy Logic", *IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. 12, No. 11, November, 1990.