

# 고주파 영역 자속 스펙트럼 감시에 의한 전동기 고정자 고장예측

김대영, 여영구\*, 이재현\*\*<sup>†</sup>

한국남동발전, \*한양대학교 화학공학부, \*\*한양대학교 기계공학부

## Prediction of Failure for a Motor Stator by Monitoring Magnetic Flux Spectrum in High Frequency Region

Dae-Young Kim, Yeong-Koo Yeo\*, Jae-Heon Lee\*\*<sup>†</sup>

Korea South East Power Company, Co. Ltd., Seoul 135-280, Korea

\*School of Chemical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

\*\*School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

(Received Jun 22, 2012; revision received Aug 16, 2012)

**초 록 :** 현재 운영 중인 발전소 전동기의 고정자 권선 고장 실제사례를 토대로 전동기에서 발생하는 자속 데이터의 고주파 영역 스펙트럼을 분석함으로써 결함이 있는 전동기와 건전한 전동기의 자속 특성 및 변화추이를 분석하였다. 전동기 자속 스펙트럼의 고주파 영역을 분석한 결과 결함이 있는 전동기는 고정자 슬롯 주파수 대비 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수의 상대적 크기 비율이 건전한 전동기에 비해 매우 높음을 확인하였다. 또한 결함이 있는 전동기는 시간이 지날수록 고정자 슬롯 주파수 대비 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수의 상대적 크기 비율 크기도 더욱 커지는 현상도 확인하였다. 그리고 결함이 있는 전동기의 자속 데이터는 불시 고장 1개월여 전부터 결함 상태를 인식할 수 있는 신호를 나타냄으로써 전동기 고정자 권선 결함에 대한 사전 예측능력이 매우 탁월함을 확인하였다.

**ABSTRACT :** In this study, the way how we can find the defects of motor windings in advance will be discussed. The magnetic flux spectrum in the high frequency region of the large motor was analyzed based on the actual fault practices related with motor windings. In case of defective motor relative amplitude ratio of the stator slot frequency to its sideband was very high compared to that of healthy motor. And the defective signal related with motor windings was indicated in advance in the magnetic flux spectrum prior to over 1 month before failure. Considering this aspect it can be estimated that magnetic flux spectrum in the high frequency region has the excellent predictive diagnostic capability.

**Key words :** magnetic flux(자속), stator slot frequency(고정자 슬롯 주파수), predictive diagnosis(예측진단)

### 1. 서 론

#### 1.1 연구 배경

최근 발표된 제5차 장기전력수급계획<sup>[1]</sup>에 의하면 우리나라의 전력수요는 2024년까지 매년 평균 약 3.1% 증가할 것으로 예상하고 있다. 최대 전력수요는 기후변화 등으로 냉난방 수요가 급증하여 전력수요가 경제성장률을 넘어서고 있는 추세에 있다. 이러한 전력수요의 급증과 발전소 신규 건설부지 확보의 어려움 및 고온, 고압 발전설비 제작기술의 발달로 오늘날 발전플랜트는 과거에 비해 점점 대용량화 추세에 있다.

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel. +82-2-2220-0425; Fax +82-2-2220-4424

E-mail address: jhlee@hanyang.ac.kr

설비의 대형화 추세에 맞춰 플랜트를 구성하고 있는 각각의 전동기도 대형화되고 있으며 이러한 설비들의 안정운전은 플랜트 전체 기기의 안정운전에 막대한 영향을 미치고 있다.

발전소 고압 전동기의 경우 현재 중앙제어실 운전원이 상시 감시하는 운전 요소로서는 대부분 진동과 전류 및 베어링 온도에 의존하고 있다.

최근 전동기의 상태감시 요소로서 일반적으로 알려진 진동 감시와 전혀 다른 방법으로 국내 발전소에서 2000년대 중반 이후 적용하고 있는 예측진단설비의 일종인 자속감시 시스템이 영흥화력 발전소 3, 4호기를 비롯하여 일부 발전소에 적용되고 있다.

2009년 2월 12일 영흥화력발전소 4호기 3,800 kW 탈황용 승압팬(Booster Fan) 전동기가 중앙제어실 운전원이 전혀 예측할 수 없는 상태에서 불시 정지되어 출력을 880 MW에서 440 MW로 감발(減發)하여 운전한 바 있다. 제작업체에서 고장 전동기 외부 반출 후 내부정밀 분석결과 고정자 권선 결함으로 판명되었다.

본 연구에서는 동 사례를 중심으로 결함 있는 전동기와 건전한 전동기 1개월 동안 자속 데이터를 상호 비교 분석하고 이를 통해 전동기 고정자 권선 결함 발생 시 나타나는 자속 스펙트럼 특성을 알아내고자 한다. 이를 통해 자속 스펙트럼 분석에 의한 전동기 고정자 권선 결함 사전 예측방법을 정립하고 전동기의 불시 정지를 예방함으로써 발전플랜트 안정운전을 도모하고자 한다.

## 2. 자속 스펙트럼 특성

### 2.1 자속 스펙트럼 생성

Fig. 1<sup>[2]</sup>은 일반적으로 전동기 권선 끝단에 누설자속이 발생하는 형상을 나타낸 그림이다. 이 누설자속은 고정자 권선과 회전자 권선에 흐르는 전류에 의하여 전동기 끝단에서 발생한다. 또한 전력계통에서 완전한 삼상 평형 전원을 공급한다 하더라도 전동기 한 쪽에 위치하는 단자함 등의 구조적 비대칭성으로 인하여 누설자속은 항상 존재한다.

이와 같은 사유로 전동기 누설자속 스펙트럼 감시는 유도 전동기의 전기적 상태를 감시하는데 사용될 수 있다. 누설자속 센서 부착위치 및 전동기 정격류의 크기에 따

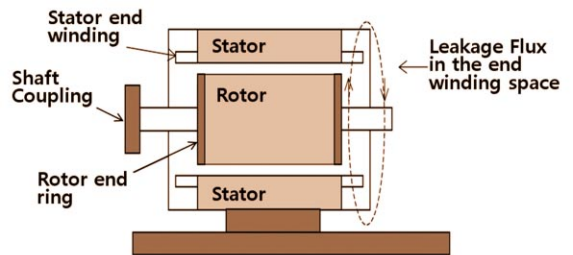


Fig. 1 Simplified presentation of leakage flux in the end winding space

라 누설자속이 변동하기 때문에 누설자속의 크기 자체가 반드시 중요한 의미를 갖는 것은 아니고 누설자속 스펙트럼의 상대적 변화추이(trend)에 대한 관찰이 무엇보다 중요하다.

누설자속을 분석하기 위해서는 저주파와 고주파 성분 등 주파수별로 나누어야 하는데 이를 구현하기 위해서 원(raw) 데이터를 A/D(analogue to digital) 변환하고 이를 다시 주파수 스펙트럼 영역으로 바꾸어주는 FFT(fast Fourier transform) 변환을 거치면 자속 스펙트럼 데이터가 생성되어진다.

### 2.2 주요 결함 자속 스펙트럼

여러 개의 고정자 슬롯을 통과하는 자속은 고조파(harmonics) 성분을 야기시킨다. 고정자(stator) 슬롯에 기인하는 고조파 주파수는 다음과 같이 나타낼 수 있다고 Alger<sup>[3]</sup>는 제시하였다.

$$f_{SS} = f_L \left( \frac{N_{SS}}{P} \pm 1 \right) \quad (1)$$

여기서  $f_{SS}$ 는 고정자 슬롯 주파수,  $f_L$ 은 계통 주파수,  $N_{SS}$ 는 고정자 슬롯 수,  $P$ 는 극수이다.

예측진단설비 제작자인 에머슨 CSI 매뉴얼(2004)에서는 고정자를 통과하는 주요 주파수는 다음과 같다고 하였다.<sup>[4]</sup>

$$f_{PS} = (N_{SS} \times f_r) - f_L \quad (2)$$

## 고주파 영역 자속 스펙트럼 감시에 의한 전동기 고정자 고장예측

여기서  $f_{rs}$ 는 고정자 슬롯 주파수,  $f_l$ 은 계통 주파수,  $N_{ss}$ 는 고정자 슬롯 수,  $f_c$ 은 정격회전 주파수이다.

그리고 CS기 매뉴얼에서는 저주파수 영역에서 전원 계통 주파수보다 인접 회전속도 사이드밴드 주파수가 더 클 때 결함 형태가 더 커질 수 있다고 언급하였다.

고주파수 영역에서의 결함 주파수는 CS기 매뉴얼에서 양호한 상태일 때와 결함이 있을 때 다음과 같은 주파수 즉  $(f_{rs} + 2f_l)$ ,  $(f_{rs} + 2f_l + f_l)$ ,  $(f_{rs} + 8f_l)$ 에서 가장 큰 변화가 생긴다고 언급하였다.

### 3. 전동기 고정자 고장예측

#### 3.1 고장예측 대상설비

본 연구에서 논하고자 하는 영흥화력 4호기 탈황용 승압팬(BUF)은 보일러에서 연소를 마친 연소가스를 탈황 설비 운전에 필요한 압력 이상으로 승압하기 위해 필요한 설비로서 발전설비 정격운전시 1대 50% 용량 부담으로 총 2대가 설치되어 있다. 영흥화력 4호기는 2008. 12. 01 상업운전을 시작하였으며 Table 1은 탈황용 승압팬 전동기 제원을 나타낸 표이다.

#### 3.2 자속 스펙트럼 측정방법

영흥화력 발전소 4호기에 적용된 자속감시 시스템은 예측진단설비의 일부분으로서 Emerson Process Management사의 CS기에서 공급하였다. Flux Coil 외경은 6.5 인치이다. 이 센서는 전동기에서 생성되는 누설 자속을 감지하여 CS기 자체 분석기(analyzer)에서 사용이

가능하도록 제작되었다.

자속 센서에 의해 누설자속 데이터가 취득되는 형태에 대해 Misakian *et al.*<sup>[5]</sup>은 누설자속이 자속 센서에 유기되는 유도전압으로 표현하였는데 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$e = - N\omega B_0 A \cos\omega t \quad (3)$$

여기서  $e$ 는 누설자속에 의한 유도전압,  $N$ 은 센서 루프 내 와이어 감긴 수,  $\omega$ 는 각 주파수(angular frequency)로서 누설자속 주파수에  $2\pi$  곱한 수,  $B_0$ 는 누설자속 밀도,  $A$ 는 센서 루프 면적이다.

자속 센서를 통한 자속 측정 방식은 자속 자체를 측정하는 것이 아니라 식 (3)과 같이 자속을 통해 유기되는 유도전압을 측정하는 간접 측정방식이다. 따라서 센서를 통해 측정된 값의 단위는 자속 단위 [Wb]를 사용하지 않고 임의의 단위인 [AU](arbitrary unit)를 사용한다.

#### 3.3 스펙트럼 분석에 의한 고장위치 파악

##### 3.3.1 고정자 슬롯 주파수 선정

앞서 언급한 바와 같이 2009. 02. 12. 03시경 영흥화력 4호기 탈황용 승압팬 두 대 중 한 대가 불시 고장정지되는 시점을 기준으로 1개월 전 자속 데이터와 정지 4시간 전 자속 데이터에 대해 고장이 발생하였던 결함 전동기와 동일용량, 동일기능을 갖고 정상적인 운전을 하고 있었던 건전한 전동기를 비교하고자 한다.

영흥화력 3, 4호기에 적용된 예측진단설비는 주 제어설비와 연계되어 있지 않아 중앙제어실 운전원의 통상적인 감시요소에서 제외되고, 예측진단 시스템은 약 4시간 주기의 일정 간격으로만 현장 자동측정 데이터를 저장하므로 고장 바로 직전 데이터는 시스템에 저장되지 않아 확인할 수는 없었다.

고주파 영역 분석에 앞서 고주파 중에서도 어느 주파수 영역을 분석할 것인지 결정하여야 한다. 전동기에서 고주파의 기준이 되는 주파수는 고정자 슬롯 주파수와 회전자 슬롯 주파수이다.

고정자와 관련된 고주파 주파수는 다음과 같이 표현될 수 있다.

Table 1 FGD booster fan motor data of YH thermal power plant unit 4

Item	Motor Specification
Capacity	3,800 kW
Rated voltage	6,600 kV
Rated frequency	60 Hz
Pole number	8
Nominal rotating speed	895 rpm (14.92 Hz)
Rotor type	Squirrel cage

$$f_{ss} = f_r \times N_{ss} \quad (4)$$

여기서  $f_{ss}$ 는 고정자 슬롯 주파수,  $f_r$ 은 정격회전속도,  $N_{ss}$ 는 고정자 슬롯 수이다. 따라서 정격회전속도인  $f_r$ 은 14.92 Hz, 고정자 슬롯 수인  $N_{ss}$ 는 96개이므로 고정자 슬롯 주파수  $f_{ss}$ 는 식 (4)에 의해 계산하면 1,432.32 Hz가 된다. 고정자 슬롯 주파수인 1,432.32 Hz를 기준으로 좌우 주변 주파수(sideband)를 확인해 볼 필요가 있다.

또한 자속 데이터의 특성에 대해 앞 장에서 언급하였듯이 결함이 있는 전동기와 건전한 전동기 자속센서 부착 위치가 약간 상이하므로 두 설비간의 자속 측정값 자체 비교보다는 1개월여 동안 특정 주파수의 변화추이(trend)에 대해 집중하여 분석하고자 한다.

### 3.3.2 결함 전동기 자속 스펙트럼 분석

Fig. 2는 결함이 있는 전동기의 고장 1개월 전 고주파 자속 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 결함이 있는 전동기의 1개월 전 고정자 슬롯 주파수는 1,436.0 Hz로 나타나고 있고, 고정자 슬롯 주파수를 기준으로 인접된 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수는 1,421.3 Hz와 1,450.7 Hz에서 나타나고 있다.

자속 스펙트럼에서 나타난 고정자 슬롯 주파수인 1,436.0 Hz는 식 (4)에서 전동기 명판에 근거하여 계산한 고정자 슬롯 주파수인 1,432.32 Hz와 근접한 주파수

이다. 전동기 명판 기준으로 계산한 고정자 슬롯 주파수와 자속 스펙트럼 분석에 의해 추정되는 고정자 슬롯 주파수의 차이가 발생하는 이유는 전동기 운전 당시 실제 전원 주파수의 미세한 변동, 팬 부하 상태, 베어링의 마찰 상태, 윤활유 열화 등의 복합적인 이유가 작용하였을 것으로 추정된다.

그리고 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수는 고정자 슬롯 주파수를 기준으로 높은 주파수 방향과 낮은 주파수 방향으로 정격 회전수인 14.92 Hz와 근사한 14.70 Hz 간격만큼 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

또한 고정자 슬롯 주파수 크기 대비 높은 주파수 방향으로 인접된 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수 크기의 상대적 크기 비율이 약 9.35배로 매우 높게 나타나고 있음을 볼 수 있다. 이는 앞서 2.2절에서 언급한 것처럼 기준 주파수 자속 크기 대비 사이드밴드 주파수 자속 크기가 커질 때는 결함 형태가 커질 수 있음을 지적한 것과 매우 흡사한 양상이다.

Fig. 3은 결함이 있는 전동기의 고장 4시간 전 고주파 자속 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 고장 4시간 전 자속 스펙트럼 데이터에서는 기준 주파수인 고정자 슬롯 주파수가 1,437.0 Hz에서 나타나고 있고 인접된 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수는 1,421.8 Hz와 1,452.2 Hz에서 나타나고 있다.

여기에서도 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수는 고장 1개월 전 자속 스펙트럼과 비슷하게 고정자 슬롯 주파수를

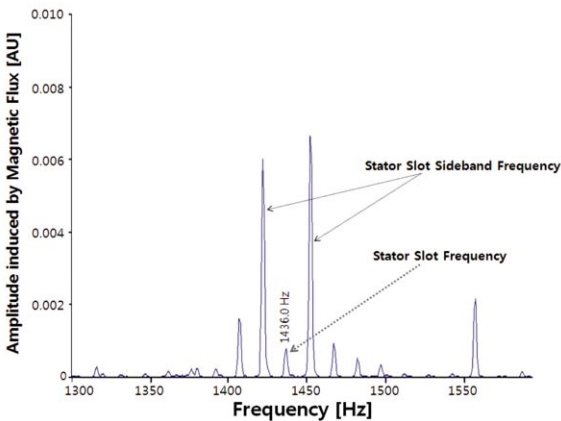


Fig. 2 High frequency 1 month ago before failure of defective BUF(A) motor

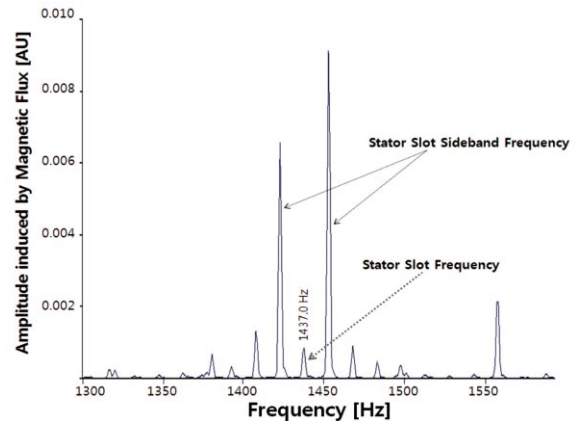


Fig. 3 High frequency 4 hours ago before failure of defective BUF(A) motor

## 고주파 영역 자속 스펙트럼 감시에 의한 전동기 고정자 고장예측

기준으로 정격 회전수인 14.92 Hz와 근사한 15.20 Hz 간격으로 나타나고 있다. 고장 1개월 전 자속 데이터와 비교할 때 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수의 간격이 약간 차이가 나는 것은 전동기 운전 당시 시점을 기준으로 앞서 언급한 것처럼 전원 주파수 및 전동기의 실 부하 등의 미세한 차이로 인하여 실제 운전 회전속도에서 약간의 변화가 생긴 것 때문인 것으로 추정된다.

그리고 고장 4시간 전 자속 스펙트럼에서 고정자 슬롯 주파수 크기 대비 높은 주파수 방향으로 바로 인접된 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수 크기의 상대적 크기 비율이 고장 1개월 전보다도 더욱 커져서 약 9.98배에 이르고 있다. 전동기 고장 4시간 전 자속 스펙트럼을 분석할 때 결합 양상이 고장 1개월 전에 비해 더욱 악화된 것으로 보이며 이는 해당 전동기의 불시고장이 곧 임박하였음을 의미하고 있는 것으로 판단되어진다.

Fig. 2와 Fig. 3의 자속 스펙트럼 데이터를 통해서 볼 때 자속 스펙트럼은 전동기 고장 1개월 전부터 선형적으로 고정자 권선과 관련된 결합이 진행되고 있음을 의미하는 신호를 나타내고 있었음을 알 수 있다. 따라서 고장 전동기는 고장 직전에 갑자기 발생한 결합에 의해 불시정지된 것이 아니라 적어도 1개월 전부터 고정자 권선과 관련된 결합이 꾸준히 진행되고 있었고, 결국 결합이 확대되어 불시정지된 것으로 추정된다.

### 3.3.3 건전한 전동기 자속 스펙트럼 분석

Fig. 4는 결합이 있는 전동기의 고장시점을 기준으로

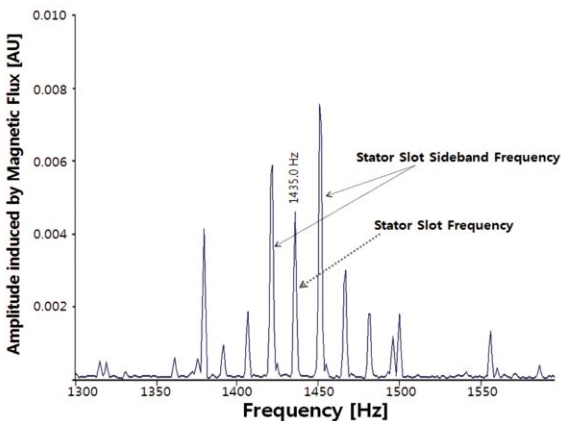


Fig. 4 High frequency 1 month ago before BUF(A) failure of healthy BUF(B) motor

건전한 전동기의 1개월 전 자속 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 고정자 슬롯 주파수는 1,435.0 Hz이고, 고정자 슬롯 주파수를 기준으로 인접된 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수는 1,419.6 Hz와 1,450.4 Hz에서 나타나고 있다. 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수는 고정자 슬롯 주파수를 기준으로 높은 주파수 방향과 낮은 주파수 방향으로 정격 회전수인 14.92 Hz와 근사한 15.40 Hz 간격만큼 일정하게 나타나고 있음을 알 수 있다. 고정자 슬롯 주파수 크기 대비 높은 주파수 방향으로 인접된 고정자 슬롯 사이드밴드 주파수 크기의 상대적 비율은 1.83 배이다. 이것은 동일시점 결합이 있는 전동기의 것과 비교했을 때 상대적으로 매우 작다. 고정자 슬롯 주파수 크기 대비 고정자 슬롯 주파수 크기의 상대적 비율이 작다는 것은 전동기가 안정적인 상태에서 운전되고 있는 것을 의미한다. 결합이 있는 전동기와 건전한 전동기의 각 주파수별 자속 크기 자체에 대한 비교는 앞서 언급한 것처럼 두 전동기 간의 센서 부착위치 상이에 따른 자속 크기의 영향이 있을 수 있으므로 중요한 의미를 두지 않고 생략하겠다.

Fig. 5는 결합이 있는 전동기의 고장시점을 기준으로 건전한 전동기의 4시간 전 자속 스펙트럼을 나타낸 그림이다. 고정자 슬롯 주파수는 1,437.0 Hz이고, 고정자 슬롯 주파수를 기준으로 인접된 고정자 슬롯 주변밴드 주파수는 1,421.7 Hz와 1,452.3 Hz에서 나타나고 있다. 고정자 슬롯 주변밴드 주파수는 고정자 슬롯 주파수를

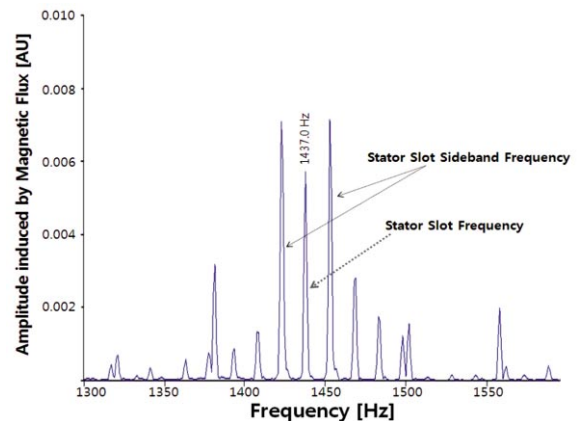


Fig. 5 High frequency 4 hours ago before BUF(A) failure of healthy BUF(B) motor

기준으로 높은 주파수 방향과 낮은 주파수 방향으로 정격 회전자인 14.92 Hz와 근사한 15.30 Hz 간격만큼 일정하게 나타나고 있다. 고정자 슬롯 주파수 크기 대비 높은 주파수 방향으로 인접된 고정자 슬롯 주변밴드 주파수 크기의 상대적 비율은 1.29배로 1개월 전 값과 비교할 때 오히려 작아졌다. 결함이 있는 전동기에서의 경우, 동일 주파수 영역에 대한 상대적 크기 비율이 고장 1개월 전에 비해 고장 4시간 전이 커진 것과는 정반대의 현상이다. 자속 스펙트럼 데이터 분석을 통해서 볼 때 건전한 전동기는 고정자 권선과 관련된 문제가 없는 것으로 예측할 수 있다. 실제 건전한 전동기는 본 자속 스펙트럼 데이터 취득일 기준으로 3년 6개월이 지난 지금 시점에서 고장 권선과 관련된 문제없이 안정적으로 운전되고 있다.

이번 영흥화력 4호기 현장에서 취득된 자속 스펙트럼에서 밝혀진 결함 주파수 형태와 앞서 2장의 선행 연구에서 밝혀진 자속 결함 주파수가 약간 상이한 부분은 눈여겨 볼 부분이지만 이런 차이에 대한 이유는 더 많은 사례 연구를 통해서 분석하여야 할 사항으로 본 연구에서는 그 이유에 대한 판단은 보류하고자 한다.

#### 4. 결론

발전소 고압 전동기의 자속 데이터를 비교 분석한 결과 다음의 결론을 얻게 되었다.

- 1) 자속 스펙트럼의 고주파 영역에서 고정자 슬롯 주파수 대비 고정자 슬롯 주파수 주변밴드의 상대적 크기 비율이 고정자 권선 결함이 진행되고 있을 경우 9배 이상 높게 나타나고 시간이 지날수록 상대적 크기 비

율도 더욱 커짐을 확인하였다.

- 2) 자속 데이터는 전동기 불시 고장 1개월여 전부터 결함 상태를 인식할 수 있는 신호를 나타냄으로써 전동기 고정자 권선 결함에 대한 사전 예측능력이 매우 탁월함을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 지식경제부 공고 제 2010-490호, 2010.12, 제5차 장기전력수급계획, p. 16.
2. Voitto Kokko, 2003, Condition Monitoring of Squirrel-cage Motors By Axial Magnetic Flux Measurements, Oulu.
3. Alger P, 1970, Induction Machines, Gordon and Breach Science Publishers, New York, p. 518.
4. CSi, 2004, Motorview for AMS Suite: Machinery Health Manager.
5. Misakian M, Silva JM & Baishiki RS, 1991, Measurement of power frequency magnetic fields away from power lines, IEEE Transactions on Power Delivery, pp.6(2):901-911.
6. Motor Reliability Working Group(Power Systems Reliability Subcommittee), 2007, Report of Large Motor Reliability Survey of Industrial and Commercial Installations, IEEE Industry Applications Society.
7. 회전기설계부, 2009, 영흥화력 4호기 탈황 BUF용 전동기 권선사고 보고서, 현대중공업(주).