

원자력발전소용 Motor Control Center의 내진검증시험

Seismic Qualification Test on Motor Control Center for Use in Nuclear Power Plants

김 병 현* 김 영 중* 정 정 훈* 문 석 준*
Kim, Byung-Hyun Kim, Young-Joong Chung, Jung-Hoon Moon, Seok-Jun

ABSTRACT

The safety related equipments for use in nuclear power plants should be subjected to the seismic qualification in order to insure the safety of the nuclear power plant. This paper summarizes the seismic qualification test on the Low Voltage Motor Control Centers(MCC's) for use in Wolsong Nuclear Power Plants, Units 2, 3 and 4. The seismic qualification test was performed on the two prototype MCC's(a two-bay wide unit for Phase #1 Test and a five-bay wide unit for Phase #2 Test). The specimens were electrically powered and monitored during the test process. It was demonstrated that the specimens possessed sufficient structural and electrical integrity to withstand the required seismic conditions.

1. 서 언

원자력발전소(원전)에 사용되는 안전에 중요한 기기(Equipment important to safety)는 가상되는 최악의 환경조건하에서도 그 성능이 유지되어야만 원전의 안전성을 확보할 수 있다. 기기검증(Equipment Qualification)이란 안전에 중요한 기기를 선별하고, 지진 등 자연현상 및 가상의 사고를 포함한 제반 환경조건이 이들 기기에 미치는 영향을 평가하여 기기의 설치수명 기간중 예상되는 여하한 환경조건하에서도 안전성 확보에 필요한 주어진 기능을 수행할 수 있음을 입증하여 문서화(Documentation)하고 이를 유지하는 일련의 행위이다. 원전은 어떠한 경우에도 주민과 환경의 보호를 위해 안전성확보를 최우선으로 하여야 하며 기기검증은 이를 위한 필수요건 중의 하나이다. 기기검증은 편의상 내진검증(Seismic Qualification)과 내환경검증(Environmental Qualification)으로 대별하고 있다. 내진검증은 가상되는 최대의 지진(Safety Shutdown Earthquake-SSE)발생중 및 후에도 안전에 중요한 기기들이 고유의 기능을 정상적으로 수행하여 원자로의 안전이 보장될 수 있도록 해석이나 시험을 통해 기기나 부품의 설계 또는 제작시 설계기준에서 요구되는 기기의 구조적 건전성 및 구동성을 입증하는 행위이다.

국내에서의 기기검증 현황은 시험시설의 미비와 관련 전문인력의 부족 등으로 국내원전용 기기에 대한 기기검증도 대부분 외국 전문회사에 의존하고 있는 실정이다. 최근 원전기기 국산화개발에 많은 노력이 경주되고 있으나 기기검증의 국내 자립화가 이루어져 있지 못함으로 인하여 기기 국산화에 큰 장애 요인이 되고 있다. 기기검증의 국내 자립화는 자체 기술에 의한 원전의 안전성 확보와 더불어 원전기기 국산화에 중요한 선행조건이다.

* 한국기계연구원 구조시스템연구부, 정회원

한국기계연구원은 1989년에 대형 6 D.O.F. Seismic Simulator를 설치·운용을 시작한 이래 이를 이용하여 내진검증시험을 수행해 오고 있다. 본 논문에서는 월성원자력발전소 2,3,4호기에 설치될 Motor control center에 대한 내진검증시험의 연구결과[1]를 요약하였다. 내진검증시험을 통해 대상 기기가 주어진 지진조건하에서 구조 건전성 및 작동성능이 충분히 유지됨을 보였으며, 아울러 내진검증시험의 방법과 절차도 함께 소개하였다.

2. 시험모델 및 내진검증요건

2.1 시험모델

내진검증 대상기기는 LG산전(주)가 제작한 5종의 motor control center(MCC)이다. 이 기기는 월성원자력2,3,4호기의 secondary control area 와 service building에 설치되어 발전소 안전에 관련된 motor를 제어하는 전기기기로서, IEEE Class1E 기기[1]이다. 이 5종의 MCC 모두에 대해 내진검증 시험을 수행하는 대신에 이들을 대표하는 2개의 검증시험용 모델(모델 #1과 모델 #2)을 제작하여 이 모델에 대해 내진검증을 수행하였다. 이 검증용 모델에는 실제 대상기기가 가지고 있는 안전에 관련된 부품들 모두를 포함시키고 이 부품들은 실제 기기에 설치되었을 때보다 지진응답 측면에서 불리한 위치에 설치되었다. 모델 #1은 secondary control area에 설치되는 MCC에 대한 것으로 2개의 module로 구성되어 있으며, 모델 #2는 service building에 설치되는 MCC에 대한 것으로 모델 #1에 3개의 module을 추가한 5개의 module로 구성되었다. 이 모델의 설계와 그 타당성에 대한 검토는 미국 Wyle Laboratories에서 수행하고 제작은 LG산전(주)가 하였다. 모델 #2의 외관은 Fig. 1과 같다.

2.2 내진검증요건

모델 #1과 모델 #2는 각각 주어진 요구응답 스펙트럼(Required Response Spectrum)에 해당하는 지진조건에 대해 내진검증 되어야 한다. 이들 요구응답 스펙트럼은 각각 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake-SSE)에 대한 secondary control area와 service building의 층응답 스펙트럼(Floor Response Spectrum-FRS)으로부터 얻어진 것으로 모델 #2에 대한 요구응답 스펙트럼은 Fig. 2와 같다. 운전기준지진의 요구응답 스펙트럼은 안전정지지진 요구응답 스펙트럼의 1/2이다.

대상기기는 상기 지진조건하에서 전기적으로나 구조적으로 건전성이 유지되어야 하며, 지진조건하에서 회로 접속상태의 단락이 2 msec 이상이 되어서는 안된다. 또한 지진하중을 받은 후 검사에서 기능 수행에 영향을 미칠만한 구조적인 손상이 발견되어서는 안된다.

3. 시험시설

내진검증시험은 한국기계연구원이 보유하고 있는 대형 6 D.O.F. Seismic Simulator를 사용하여 수행되었다. 이 Seismic Simulator는 조화파형, 랜덤파형 및 각종 지진파와 실제 계측된 진동파형등 임의의 파형을 재생, 구현할 수 있으며 시험체의 진동응답을 동시에 계측하고 기록함으로써, 시험체가 놓여지는 환경과 동일한 상황에서의 특성을 예측, 분석할 수 있다.

이 시스템은 Table 1에서 보는 바와 같이 최대 30톤의 시험체를 4m×4m크기의 진동대에 설치한 후, 최대 1.5g까지의 가속도를 받도록 가진할 수 있으며, 가진과 동시에 56개의 진동신호를 계속·기록할 수 있다. 이중 32개는 내장된 증폭기를 이용하는 스트레인게이지형 신호변환기용이며 24개는 기타 외부의 증폭기를 이용하게 되는 신호변환기용이다.

이 시스템은 6자유도 제어능력을 갖추으로써 공간상에서 움직이는 시험체의 모든 운동을 구현한다. 즉, 3축의 병진운동 뿐만 아니라 임의의 회전운동도 구현할 수 있다. Fig. 3는 1축 가진시 및 2축 동시 가진시의 수직 및 수평방향 가진능력을 각각 보여주고 있다.

이 시스템은 크게 분류하면 진동대, 가진력 발생을 위한 유압시스템, 아날로그 제어시스템 및

컴퓨터를 이용한 디지털 제어시스템의 4부분으로 구성된다. Fig. 4는 각 요소별 기능을 보여주고 있다. 진동대의 제어는 아날로그 제어시스템만을 이용할 수도 있다. 이 경우 입력파형으로써 신호발생기(function generator)로부터의 정현파, 삼각파등 각종 함수형 파형을 줄 수 있으며, 또한 테이프 레코더(tape recorder) 등에 기록된 임의의 파형, 즉 실제 계측된 지진파, 진동파형 등을 줄 수도 있다. 그러나 진동파형이 실제 기록되어 있지 않거나, 주파수 스펙트럼(frequency spectrum), 응답 스펙트럼(response spectrum)등 실제 파형대신 주파수 함수를 이용해야 하는 경우 및 파형이 수치(digital)로 기록되어 있는 경우는 컴퓨터에서의 파형합성 및 재생을 통한 디지털 제어시스템을 이용한다. 진동대가 구동될 때 시험체로부터 계측된 진동신호는 Anti-aliasing 필터를 거친 후 A/D 변환기에 의해 Vax Station 3200 컴퓨터에 기록·저장되며 응용 소프트웨어를 이용하여 각종 기법의 분석이 가능하다.

4 내진검증시험

4.1 시험방법

내진검증방법으로는 해석(Analysis), 시험(Test), 시험과 해석의 혼용, 경험(Experience)에 의한 방법이 사용될 수 있다. 기기나 부품의 형상이 복잡하여 수학적 모델에 의해 구조적 건전성이나 구동성 해석이 어려운 경우에 시험에 의한 검증이 필요하다. 진동대(Shake Table)를 이용하여 기기가 받게되는 지진하중을 인공적으로 만들어 시험하는 방법으로 용도에 따라서 입증시험(Proof Test), 일반시험(Generic Test) 및 파괴한도시험(Fragility Test)으로 구분되며, 시험방법에 따라서 단일주파수시험과 복수주파수시험 그리고 단축시험과 복축시험으로 구분할 수 있다.

입증시험은 주어진 특정조건만에 대한 검증을 위해 수행되는 시험으로 사전에 요구조건이 명시된 상세시방서가 마련되어 있어야 한다. 일반시험은 입증시험의 특별한 경우라고 생각할 수 있으며 알려진 모든 조건을 고려하여 한 번의 시험으로 여러범위에 적용할 수 있음을 검증하는 시험이다. 따라서 요구응답 스펙트럼은 넓은 주파수대역과 큰 가속도값을 갖게된다. 파괴한도시험은 대상기기의 능력한도를 결정하기 위한 시험으로 이 결과는 나중에 주어진 요구조건이나 적용조건에 적절한가를 비교 증명하는데 사용된다.

입력파가 건물이나 연결된 구조에 의해 필터링되어 한 주파수성분이 지배적일 경우에는 단일주파수시험을 사용할 수 있으며, 진동대 여건상 단축 또는 2축시험을 수행할 경우에는 타 방향의 영향을 고려하여야 한다. 최근에는 진동대시스템의 발달로 주어진 요구응답 스펙트럼을 사용하여 복수주파수 3축시험방법이 주로 사용되고 있다. 복축(2축 또는 3축)시험에서 각 축에 동시 입력되는 파형은 서로 통계학적으로 독립이어야 한다. 본 시험에서는 입증시험으로 복수주파수 3축시험 방법을 사용하였다.

내진검증시험은 5회의 운전기준지진(Operating Basis Earthquake-OBE)시험과 이어서 1회의 안전정지지진(Safe Shutdown Earthquake-SSE)시험을 수행한다.

4.2 내진검증시험

4.2.1 시험절차

모델 #1과 모델 #2에 대한 요구 응답 스펙트럼이 서로 다르므로 이들 시험을 따로 수행하였다. 모델 #1에 대한 시험을 Phase #1시험, 모델 #2에 대한 시험을 Phase #2시험이라 하였다. 각각의 시험에서는 공진탐색시험과 랜덤 복수주파수 지진시험을 수행하였다. 시험 전후에 구조적인 결함여부를 육안으로 검사하였고, 작동성능 검증을 위한 모니터링 시스템을 구축하고 지진시험중에 전기적 작동성능을 모니터링하였다. 주요 부품이 설치된 위치에는 가속도계를 부착하여 가속도 응답을 계측하였다. Fig. 1에는 모델 #2의 가속도계 부착위치가 표시되어 있다.

4.2.2 공진탐색시험

일반적으로 지진시험전에 시험방법의 결정이나 대상기기의 동특성을 파악하기 위해 공진탐색시

험(Resonance Search Test 또는 Exploratory Test)을 수행한다. 소인율(Sweep Rate)이 분당 2옥타브이하인 정현파소인(Sine Sweep)이나 랜덤파시험을 사용하며 입력가속도크기는 비선형 영향이 나타나거나 기기에 손상이 발생하지 않도록 비교적 작은값(보통 0.2g peak)으로하며 지진파 주파수성분내의 공진주파수를 찾을 수 있도록 33Hz보다 큰 주파수까지를 고려해야 한다.

본 시험에서는 지진시험 전후의 고유진동수의 변화를 파악하기 위하여 지진시험전, 운전기준지진시험후 및 안전정지지진시험후에 공진탐색시험을 수행하였다. 3축에 동시에 서로 독립적인 랜덤신호로 가진시켰다. 이 랜덤신호의 주파수대역은 1.0Hz~50.0Hz이고 크기는 약 0.2g 이며, Fig. 5는 Phase #2시험 전에 수행한 공진탐색시험의 진동대 파형이다. 응답을 측정한 모든 점에서 모델 #1과 모델 #2 공히 지진시험 전후에 고유진동수의 변화는 없었다. 이는 지진시험으로 인하여 시험체에 구조적인 변화가 없었음을 의미하는 것이다. Fig. 6은 모델 #2의 상단 좌측끝에서 측정한 전후방향가속도의 전달함수를 보여주고있다.

4.2.3 지진시험

Fig. 2의 각축 방향에 대한 요구응답 스펙트럼에 해당하는 랜덤신호로 진동대의 각축을 동시에 30초동안 가진시켜 시험을 수행하였다. 가진 신호의 주파수대역은 1.0Hz~50.0Hz이다. 5회의 운전기준지진시험을 먼저 수행한 후 1회의 안전정지지진시험을 수행하였다. 운전기준지진시험의 요구응답 스펙트럼은 Fig. 2에 보인 안전정지지진 요구응답 스펙트럼의 1/2이다. 시험중에 480VAC 주전원을 공급하고 작동성을 모니터링하였으며 부착시킨 가속도계로부터 응답 가속도를 측정하였다.

지진시험에서는 시험체에 가해진 파의 스펙트럼 즉, 시험응답 스펙트럼(Test Response Spectrum-TRS)이 주어진 요구응답 스펙트럼을 포락(Envelop)하고 최대가속도가 요구응답 스펙트럼의 영주기가속도(Zero Period Frequency-ZPA)보다 최소한 같거나 커야한다. 시험후 진동대 파형을 분석하고 가진된 시험응답 스펙트럼은 요구응답 스펙트럼을 포락하고 있으며, 각축에 가진된 파형의 cross correlation function의 절대값은 최대0.04 이하로서 서로 독립성이 있음을 확인하였다. 이는 요구된 지진조건을 만족하는 시험이 수행되었음을 의미한다. Fig. 7은 Phase #2 SSE시험의 시험응답 스펙트럼과 요구응답 스펙트럼을 비교한 것이다. 주요부품이 설치된 위치에 부착한 가속도계들로부터 가속도 응답을 측정하고 이들의 응답스펙트럼분석을 수행하였다. 이와같은 응답스펙트럼 자료는 그 부품이 이와같은 지진조건에 대한 검증이 수행되었음을 뜻하는 것으로 향후 그부품의 내진성능 자료로 이용될 수 있다. Fig. 8은 모델 #2의 상단 좌측끝에서 측정한 전후방향가속도를 4% 감쇠의 응답스펙트럼으로 분석한 결과이다.

4.2.4 작동성능 모니터링

지진시험시 전기적 작동성능을 모니터링 시스템을 구성하였다. 모니터링 시스템은 AC 및 DC 신호를 분리 취득하기 위해 2대의 데이터 취득용 보드와 개인용 컴퓨터로 구성되어 있다. Phase #2시험에서의 전원공급, 부하상태 및 모니터링 부분 등은 Table 2에 정리하였고, 모니터링 시스템 구성도는 Fig. 9와 같다. 일반적으로 데이터 취득용 보드는 최대 $\pm 10V$ 까지 신호를 인식할 수 있으므로 480VAC 및 120VAC 신호는 변압기를 사용하여 1.43VAC 및 2.2VAC 신호로 각각 변환하여 측정하였다. 사용된 보드는 Data Translation사의 DT2831 및 DT2833이며, 측정된 신호를 실시간으로 관찰하기 위해 계속·분석 프로그램을 작성하고 PC486에서 모니터링 하였다. 데이터 취득을 위한 샘플링 주파수는 1,750Hz이며, 이는 회로의 단락 허용기준인 2 msec의 3.5배에 해당된다.

이와같은 모니터링을 통하여 지진시험중에 전기적인 작동성능에 이상이 없음을 확인하였다. Fig. 10은 FBI relay 접점상태를 보여주고 있다.

5. 결론

월성원자력발전소 2,3,4호기에 설치될 MCC에 대한 내진검증시험의 결과는 다음과 같다.

(1) 지진시험에서 가진된 시험응답 스펙트럼은 요구응답 스펙트럼을 포락하고 있으며, 각축에 가진된 파형의 cross correlation function의 절대값은 최대0.04 이하로서 서로 독립성이 있음을 확인하

였다. 이는 요구된 지진조건을 만족하는 시험이 수행되었음을 의미한다.

(2) 지진시험 전후에 수행한 공진탐색시험으로부터 고유진동수의 변화가 없음을 확인하였다. 이로 부터 지진시험으로 인하여 시험체에 구조적인 변화가 발생하지 않았음을 알수 있다.

(3) 작동성능 모니터링을 통하여 지진시험중에 전기적인 작동성능에 이상이 없음을 확인하였다. 또한 시험전후 육안검사에서도 구조적인 결함이 발생하지 않았음을 확인하였다.

(4) 따라서 이 검증시험은 대상 MCC가 주어진 지진조건에서 충분한 구조적인 성능 및 작동성능 을 갖고있음을 보여주고 있다.

6. 후 기

본 연구는 LG산전(주)의 의뢰로 수행한 연구과제의 일부이다. LG산전(주)의 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 김병현외(1996), "Seismic Qualification Test Report for Low Voltage Motor Control Centers for Use in Wolsong Nuclear Power Plant, Units 2, 3 & 4", 한국기계연구원 연구보고서 BSI199-343.M
2. ANSI/IEEE Std 344-1987, "IEEE Recommended Practices for Seismic Qualification of Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations"
3. ANSI/IEEE Std 323-1983, "IEEE Standard for Qualifying Class 1E Equipment for Nuclear Power Generating Stations"
4. 김병현(1996), "원전기기의 내진검증 요건 및 방법", 원전기기의 건전성 평가기술workshop, 한국 원자력안전기술원

Table 1 Principal performance of seismic simulator system

Specification	Performance
Max. payload	30ton
Table size	4m × 4m
D. O. F.	6 D.O.F.
Max. displacement	H=±100mm, V=±100mm
Max. velocity	H=75cm/s, V=50cm/s
Max. acceleration	H=0.5g, V=1.5g
Frequency range	DC-50Hz
Control type	Analog/Digital control
Data channel	56 ch.

Table 2 Powering, loading and monitoring items for electrical monitoring

Location	Monitoring Item
FA1	Power with 480VAC
FB1	Monitor 1 normal open(NO) and 1 normal close(NC) relay(RY) contact
FC1	Power with 480VAC Provide resistive load to simulate 80% of the required load current
FC2	Monitor the 480VAC output[one(1) φ to φ measurement] Monitor 1 NO and 1 NC circuit breaker(CB) auxiliary contact
FD1	Power with 480VAC Monitor 1 NO and 1 NC circuit breaker(CB) auxiliary contact
FC2	Monitor the 120VAC 1φ output(Secondary side of transformer) Provide resistive load to simulate 80% of the required load current
FE1	Monitor the 480VAC output[one(1) φ to φ measurement] Monitor 1 NO and 1 NC circuit breaker(CB) auxiliary contact

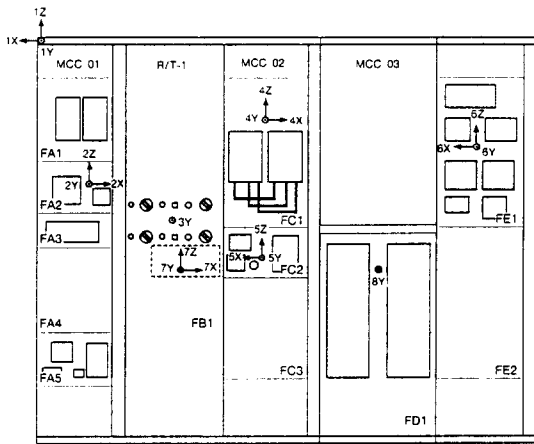
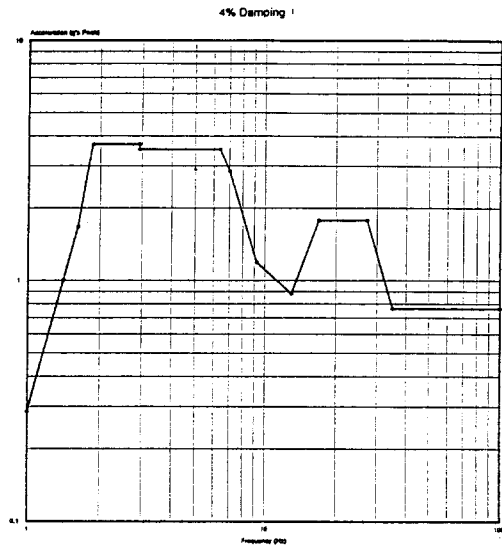
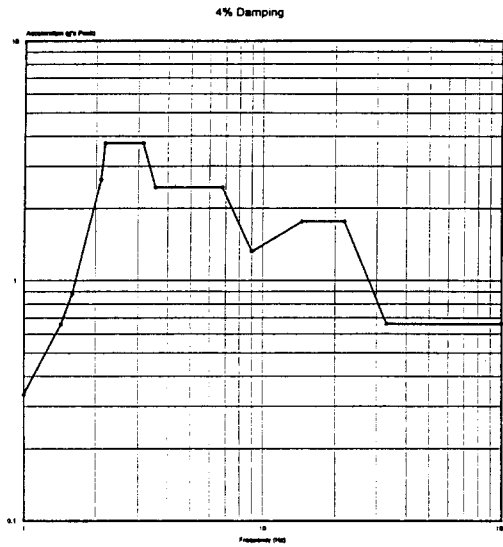


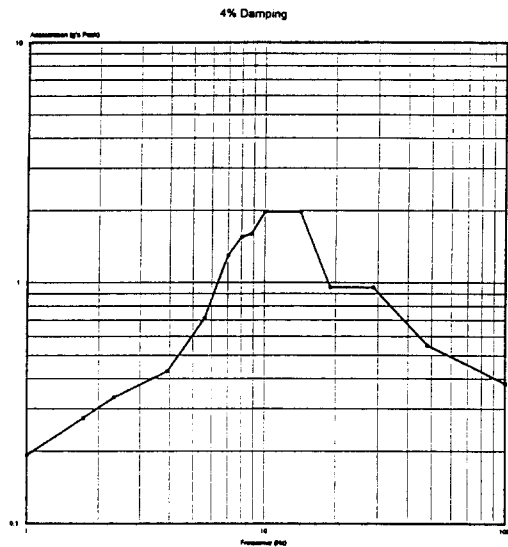
Fig. 1 Prototype #2 and sensor locations



(a) Horizontal A-C direction

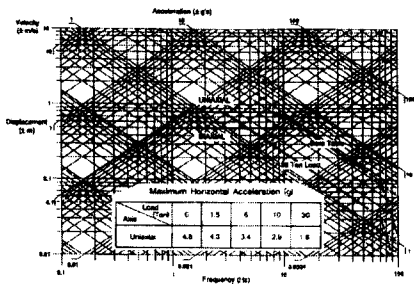


(b) Horizontal B-D direction

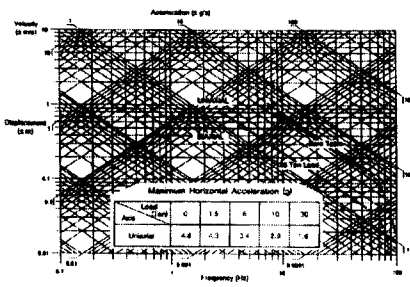


(c) Vertical direction

Fig. 2 Composite required response spectrum (with margin)



(a) Horizontal direction



(b) Vertical direction

Fig. 3 Performance curve of 6DOF seismic simulator

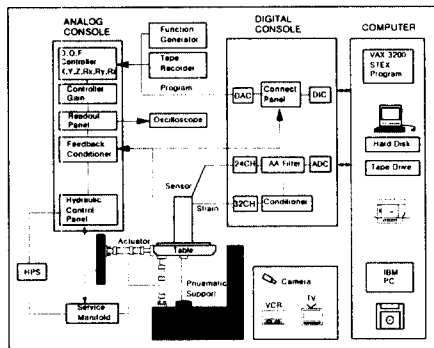


Fig. 4 Schematic diagram of 6DOF seismic simulator

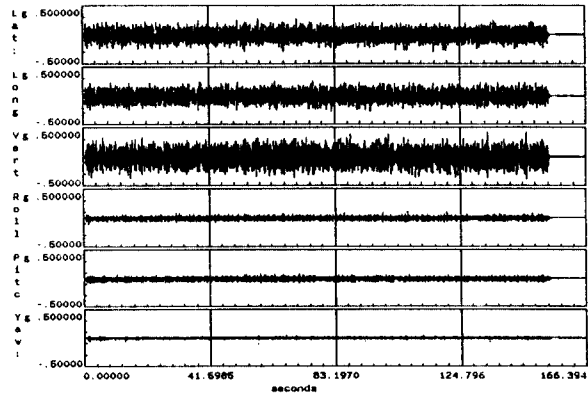


Fig. 5 Input acceleration for resonance search test

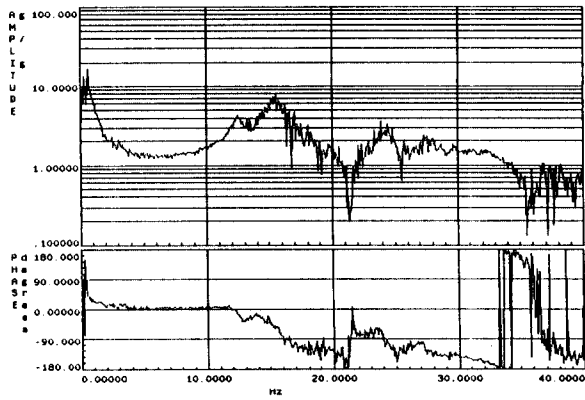


Fig. 6 Transfer function at location 1Y

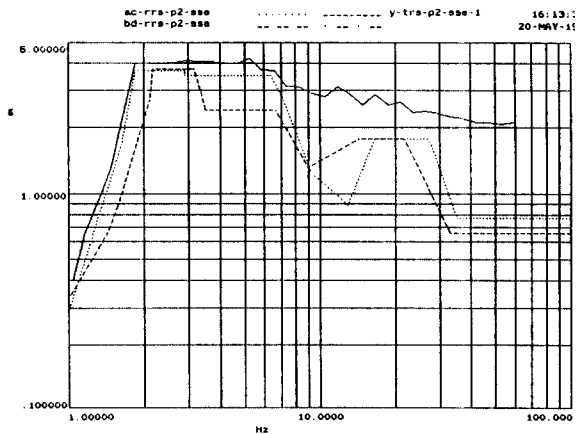


Fig. 7 TRS vs. RRS for SSE at location 1Y

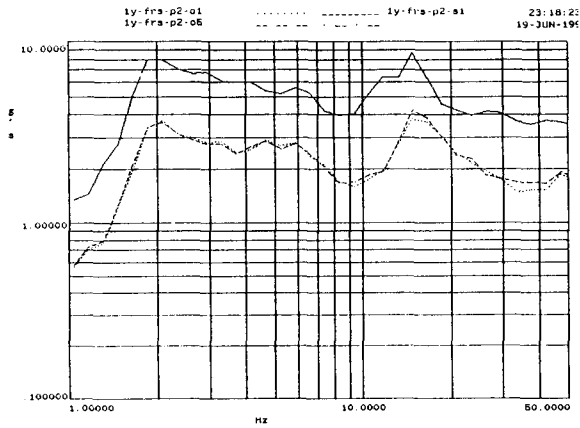


Fig. 8 Response spectra at location 1Y

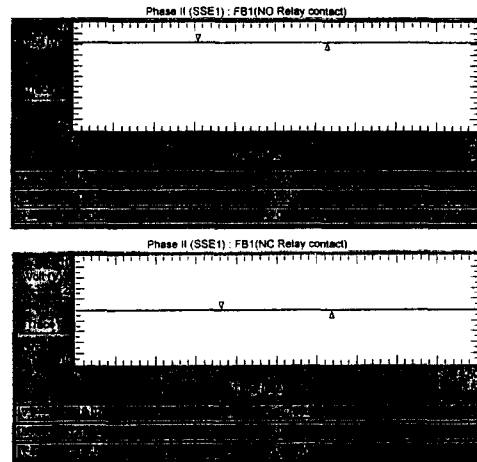


Fig. 10 Outputs of electrical monitoring

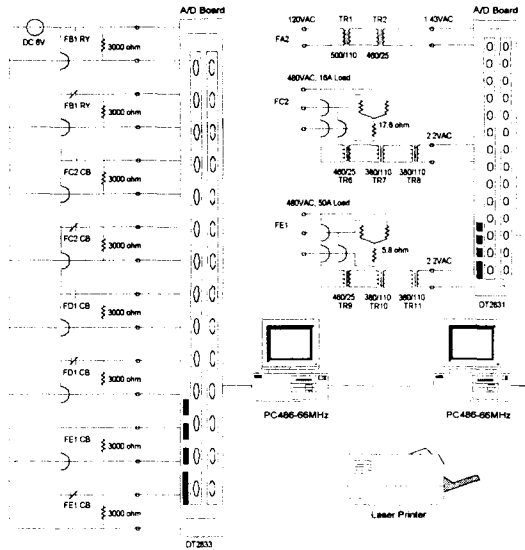


Fig. 9 Schematic diagram for monitoring system for phase #2