

Dynamic Analysis of Diesel Generators  
on Starting Large Induction Motors

Poong Han

Sung - Don Cho

KOREA POWER ENGINEERING COMPANY, INC.

ABSTRACTS

It is important to evaluate the voltage characteristics of diesel generator as an emergency power supply in nuclear power plant. On loss of offsite power sources, emergency safeguard loads required to safely shutdown the reactor should be supplied by diesel generator. This paper presents the dynamic stability program to evaluate diesel generator performance as an emergency power system. The results indicate the diesel generator ability to start the motors successfully seems to lie in its impedances and inertias.

1. 서 론

원자력발전소의 원자로 안전정지와 관련된 공학적 안전설비 계통에 전력을 공급하는 1급 안전급(Class 1E) 전기 계통은 신뢰성을 높이기 위해 일반적으로 두 개의 독립된 계통으로 구성되어 있으며, 각각의 계통은 독립된 외부전원(Offsite Power)으로부터 전력을 공급받게 되어 있다.

두 외부 전원으로 부서의 전력공급이 중단될 경우 1급 안전급 전기 계통은 비상용 디젤발전기에 의해 서만 전력을 공급받게 되므로, 비상용 디젤발전기 계통은 높은 신뢰성, 고속 기동 능력, 대용량유도전동기 기동시의 전압유지 능력 및 지속적인 운전 가능 성능의 여러 관점에서 면밀히 검토되어야 한다.

본고에서는 비상시 여러대의 대용량전동기를 순차적으로 기동시켜야 하는 디젤발전기의 전압유지 능력 및 전동기 기동 가능 성능을 분석 평가하기 위하여 개발한 동태안정도(Dynamic Stability) 프로그램을 이용하여 모의 계통을 대상으로 계정수가 각각 다른 3대의 디젤발전기 동특성을 분석한 내용을 소개하고자 한다.

2. 동태안정도 프로그램의 구성

2.1 발전기 모델링

디젤발전기(돌극형 동기발전기) 모델은 전동기 기동시의 큰 크로 전류와 여자기 계통의 자속 강제작용(Flux forcing action) 사이의 상호작용에 의한 발전기 자속변화를 고려하여 직류 성분(d-axis)에 대해서는 과도상태와 초기과도상태로, 횡류 성분(q-axis)에 대해서는 초기과도상태로 표현하였으며, 발전기에서 전동기로의 전력전달에 영향을 주는 발전기 내부 전압변화를 고려하여 발전기 자기포화 특성도 발전기 모델에 포함시켰다. 그림 1은 발전기 모델의 블록선도이며, 모의 계통에 적용된 각발전기의 계정수는 표 1과 같다.

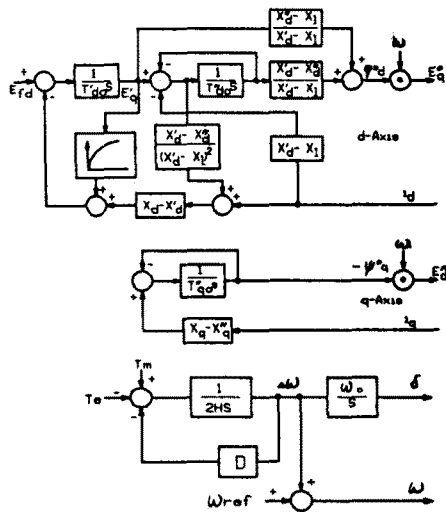


그림 1. 디젤발전기의 전자기 및 기계 모델 블록선도

# 대용량 유도전동기 기동시의 비상용 디젤발전기 동특성 해석

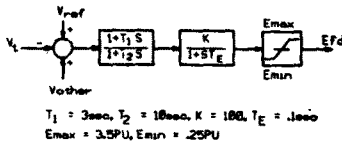
표 1. 발전기의 계정수

	발전기 A	발전기 B	발전기 C
$X_d$	1.128	1.2	1.4
$X_q$	0.656	1.236	1.236
$X'd$	0.136	0.228	0.404
$X''_d$	0.084	0.32	0.32
$X''_q$	0.084	0.32	0.32
$X'_q$	0.052	0.116	0.116
$R_a$	0.01	0.01	0.01
$T'_{do}$	4.08	4.34	4.34
$T''_{do}$	0.08	0.03	0.03
$T'_{fdo}$	0.39	0.034	0.034
$H$	2.5	1.625	1.2
$D$	0.5	0.5	0.5
* S1.0	0.08	0.08	0.08
** S1.2	0.28	0.28	0.28
MVA	4.	4.	4.

\* 정격전압에서의 포화계수  
 \*\* 120%전압에서의 포화계수  
 \*\*\* 각 계수는 발전기 MVA 기준 단위법으로 표시되었음.

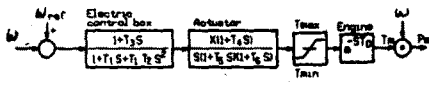
## 2.2 여자기 계통 및 조속기 계통 모델링

여자기 계통은 그림2의 단순모델 (Simplified Exciter System)<sup>3) 4)</sup>을 사용하였으며, 조속기 계통은 그림3의 Woodward Type 디젤조속기 모델<sup>3)</sup>을 사용하였다. 각 발전기에 사용된 여자기 계통 및 조속기 계통의 특성은 동일한 것으로 간주하였다.



$T_1 = 3\text{sec}, T_2 = 18\text{sec}, K = 180, T_E = 1\text{sec}$   
 $E_{max} = 3.5\text{pu}, E_{min} = -2.5\text{pu}$

그림2. 여자기 계통 모델 블록선도



$K = 18, T_1 = .822\text{sec}, T_2 = .82\text{sec}, T_3 = 1\text{sec}, T_4 = .25\text{sec}$   
 $T_5 = .83\text{sec}, T_6 = .88\text{sec}, T_7 = .85\text{sec}, T_{max} = 1\text{pu}, T_{min} = 8\text{pu}$

그림3. 조속기 계통 모델 블록선도

## 2.3 유도전동기 모델링

대용량유도전동기의 경우 기동특성을 계산하기의해 일반적으로 회전자를 2중농형으로 제작하고 있으며, 이의 동가회로는 그림4(위)와 같다.<sup>2)</sup> 그림4(위)의 동가회로는 다시 그림4(아래)의 동가회로로 간략하게 나타낼수 있으며, 여기서 Req 및 Xeq는 회전자의 계정수와 슬립(S)의 함수이다.

과도상태에서의 전동기 토오크( $T_e$ )와 전동기부하 토오크( $T_m$ )는 각각 그림4(아래)의 동가회로로부터 작성된 식1의 전동기토오크 방정식과, 제작자가 제시하는 전동기부하 특성곡선(그림5)으로부터 작성된 식2의 부하토오크 방정식에 의해 계산되어진다. 전동기는 공급전원의 전압 및 전동기 회전속도( $\omega = 1 - S$ )에 의해 결정되는 전동기토오크와 전동기 회전속도에 의해 결정되는 부하토오크와의 차에 비례하여, 그리고 전동기와 전동기부하의 관성 정수의 합(H)에 반비례하여 가속하게 된다. 이러한 전동기의 가속을 수식으로 나타내면 식3과 같다.

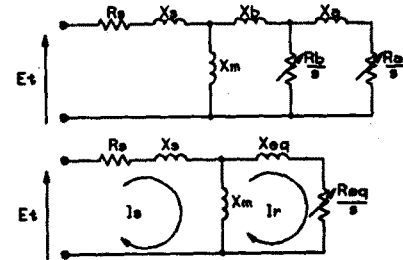
$$T_e = X_m(\text{Re}(I_s) \cdot \text{Im}(I_r) - \text{Im}(I_s) \cdot \text{Re}(I_r)) \dots \dots \text{식1}$$

$$T_m = A + B\omega + C\omega^2 \dots \dots \text{식2}$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - T_m) \dots \dots \text{식3}$$

모의 계통에 사용된 전동기 1,2,3의 계정수는 그림4와 같고, 식2의 부하토오크 계수 A,B,C는 각각 .05, -.13, 1.09로 가정하였다.

식1, 식2, 식3에 의해 구해진 전동기의 정격전압에서의 기동곡선은 그림6과 같다.



$R_s = .015, X_s = 1, X_m = 4.5, R_r = .15, X_r = .09,$   
 $R_b = .05, X_b = .07, H = .65$  on Motor MVA base.  
 Motor 1=1.1MVA, Motor 2=8.9MVA, Motor 3=8.8MVA

그림4. 유도전동기 동가회로

## 2.4 전체계통구성과 계산 알고리즘

앞에서 서술한 각 모델을 종합하여 본 전체계통 구성도는 그림7과 같다. 그림7의

External System은 각 전동기의 동가회로 및 전동기와 발전기간의 계이플임피던스가 그 구성요소이므로, 이를 매 계산 Step마다 발전기 단자에서 본 동가임피던스( $\text{Re} + j X_e$ )로 계산처리함으로써 Load Flow 계산을 위한 반복계산을 생략하였다.

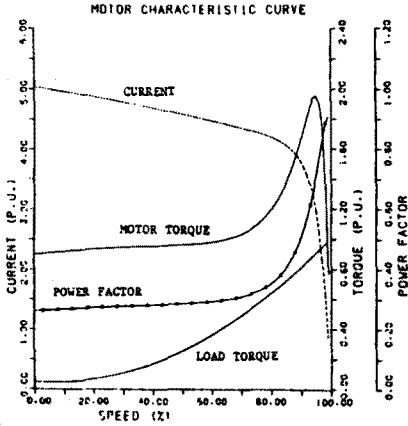


그림5. 전동기 및 전동기부하의 특성곡선

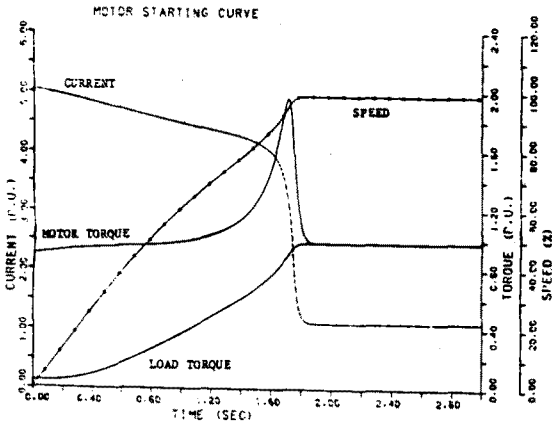


그림6. 전동기 기동곡선

각 모델에 포함된 미분방정식을 해석하기 위하여 Taylor 급수의 2차 미분항을 2개의 1차 미분항으로 바꾸어 사용하는 식4의 Trapezoidal Predictor 법을 사용하였으며, 본 프로그램에서 사용한 실제 계산 알고리즘은 식5, 식6과 같다.

$$X_n = X_{n-1} + \frac{h}{2} (3\dot{X}_{n-1} - \dot{X}_{n-2}) \quad \dots \text{식4}$$

$$\dot{X}_n = \dot{X}_{n-1} + h \ddot{X}_{n-1} \quad \dots \text{식5}$$

$$X_n = \hat{X}_n + \frac{h}{2} \dot{X}_{n-1} \quad \dots \text{식6}$$

식5, 식6의 h 는 계산 Step(ΔT)을 의미하며, 전동기의 기계적시정수가 일반적으로 0.01초 정도라 함기 때문에<sup>2)</sup> 본 모의계통 해석에서는 계산 Step을 0.001초로 하였다.

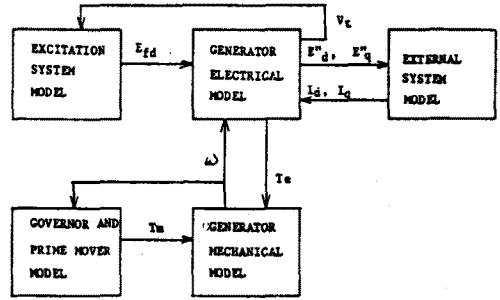
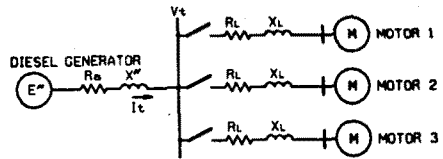


그림7. 전체계통 구성도

3. 모의계통에서의 디젤발전기 동특성 분석

모의비상전원계통의 단선도는 그림8과 같다.

전동기 1, 전동기2, 전동기3을 순차적(0초, 5초, 10초)으로 기동시켰을때의 발전기 A, B, C의 단자전압( $V_c$ )의 변화는 그림9와 같으며, 각 전동기의 가속 상에는 그림 10과 같다. 발전기 A는 각 전동기 기동시 80% 이상의 전압을 유지하였으며 발전기 B는 70%까지 전압이 떨어졌으나 고속 응답 여자기 계통에 의해 즉시 전압이 회복되었다. 그러나, 발전기 C의 경우 고속응답여자기계통이 사용되었으나 전동기 3의 기동에 실패하였다. 발전기 A의 여자기계통 및 조속기계통의 제어 특성은 각각 그림 11, 그림12와 같다.



$R_L = .004 \quad X_L = .004$  on Motor MVA base

그림8. 비상전원계통의 단선도

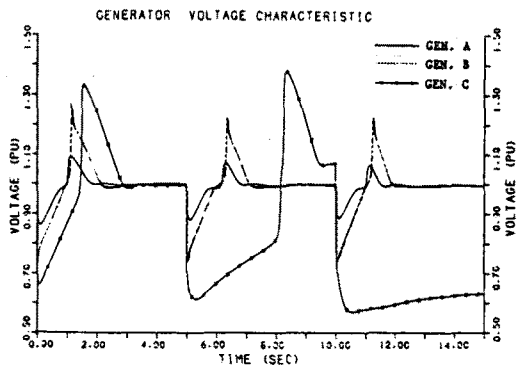


그림9. 각 발전기의 단자전압

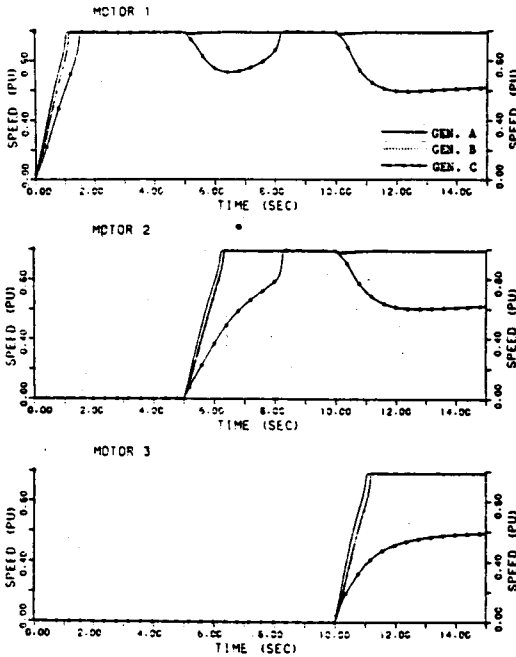


그림 10. 각 전동기의 회전속도

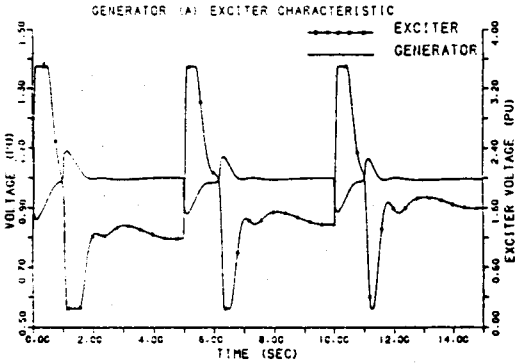


그림 11. 여자기 계통의 제어특성

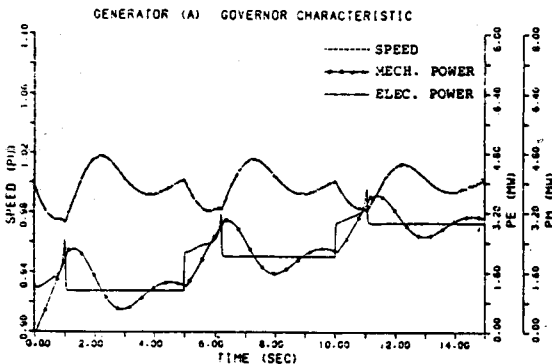


그림 12. 조속기 계통의 제어특성

4. 결 론

검토결과 같은 용량, 동일한 특성의 제어 계통을 갖춘 발전기라도 발전기 특성에 따라 전동기 기동과 같은 과도상태에서의 전압 유지 능력은 각기 다르게 나타났으며, 특히 과도 리액턴스( $X'd$ )와 감성정수(H)에 따라 크게 좌우된다. 모의계통을 대상으로 해석한 결과,  $X'd$ 가 가장 작고 H는 가장 큰 A발전기가 특성이 가장 우수한 것으로 나타났다.

본 논문은 동태 안정도 프로그램으로 대용량 유도전동기 기동시의 비상용 디젤발전기의 동특성을 정확히 분석할 수 있음을 보여주었다.

\* 참고 문헌 \*

- 1) Anderson and Fouad, "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, 1977.
- 2) John D. Plaxo 외, "Evaluation of Diesel - driven Generators for Starting an Isolated System of Motor - driven Equipment", IEEE Trans. PAS-92, PP.330-335, Jan/Feb 1973.
- 3) L.N. Hannett 외, "Validation of Nuclear Plant Auxiliary Power Supply by Test", IEEE Trans. PAS-101, PP.3068 - 3074, Sep. 1982.
- 4) PSS/E Program Application Guide, Power Technologies Inc.