2000년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2000.7.17-20

부하 모델 차이에 따른 전력계통 안정도 해석 결과 변화에 대한 평가

김봉희*
명지전문대학

An Evaluation on Change in Power System Stability Analysis Result due to Difference in Load Model

Bong-Hee Kim
Myongji College

Abstract - 본 논문에서는 프랜트 설계 단계에서 안정도 해석을 행함에 있어 부하모델의 차이가 안정도 해석 결과에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

플랜트 부하의 대부분인 유도전동기 모델을 달리 적용함에 따라 안정도 해석 시 최대 허용 고장제거시간이 매우 다르게 나타난다는 것을 보여 주었다. 또한 유도전동기의 모델 표현을 달리함에 따라 고장제거 후 모선의 전압회복 특성과 전동기 속도 회복 특성이 매우 달라짐을 보여 주면서 산업플랜트 보호계전 시스템 설계를 위한 안정도 해석 시 유도전동기 모델 적용방법에 있어 유의하여야 할 사항을 제시하였다.

1. 서 론

컴퓨터 기술의 발달로 복잡한 상업용 또는 산업용 전력계통의 해석을 이전보다 쉽게 접근할 수 있게 되고 있다. 전력계통 안정도 해석을 위한 상업용 프로그램이 개인 용 컴퓨터로 옮겨진 뒤 도스 버전으로 부터 시작하여 윈도우 버전으로 업그레이드되면서 MMI가 더욱 잘 구축되고 있으므로 전력계통에 대한 깊은 학문적 지식이나 경험이 부족한 기술자들도 안정도해석 업무를 그런대로 수행하고는 있으나 모델적용의 중요성을 간과하는 수가 있다. [1], [2]

상업용 전력계통 (commercial or bulk power system) 은 그 대상이 초고압 망 계통을 대상으로 하므로 각종 부하의 개별적 특성을 자세히 고려하지 않는다. 그러나 산업용 전력계통 (industrial power system)은 그 대상이 전력회사의 초고압 수전점으로부터 지역발전기를 포함하는 고.저압 계통의 플랜트 부하를 그 대상으로 하므로 자연히 부하의 개별적 특성을 자세히 분석하여야 한다.

본 논문에서는 플랜트 설계과정 중 필수 해석 내용 중의 하나인 전력계통 안정도 해석을 행함에 있어 적용 가능한 부하 모델의 종류를 열거한 뒤, 그 부하모델의 차이가 안정도해석 결과에 어떤 영향을 미치는지 비교 평가하고 설계 적용 시 유의할 사항을 제시하고자 한다.

2. 본 론

2.1 부하 모델의 종류

2.1.1 일반적 부하 모델

전력계통의 부하는 각 모선별로 constant power (S), constant impedance(Z), constant current(I) 중 하나 또는 이들 중의 조합으로 이루어진다. [3]

$S/S_i = (V/V_i)^k$

여기서 S : constant power k=0
I : constant current k=1
Z : constant impedance k =2
S_i : initial power
V_i : initial voltage

더 일반적인 모델은 유효 무효전력을 구분하여

$P+jQ = P_i (V/V_i)^{k1} + Q_i (V/V_i)^{k2}$ (1)

으로 표현한다.

여러 종류의 부하 그룹은 다음과 같이 다항식으로 표현된다.

$P+jQ = P_i [A+B(V/V_i)+C(V/V_i)^2] + j Q_i [D+E(V/V_i)+F(V/V_i)^2]$ (2)

부하에 대한 주파수 영향을 고려하기 위하여는 (3)식을 적용한다.

$P+jQ = P_i (1+ G \Delta f)+ j Q_i (1+ H \Delta f)$ (3)

상기 (1),(2),(3)식은 전력회사 망 계통의 안정도 해석에 주로 사용되는 데 각 모선의 부하특성을 정확히 알 수 없으므로 A부터 H까지의 계수를 구하기 어렵다. 참고 문헌 [4], [5], [6]에서 연구하여 왔으나 계수의 정확한 표현에는 한계가 있으며 부하의 정확한 계수의 동특성 해석을 요하는 산업용 전력계통 설계에 적용하기는 어렵다.

2.1.2 유도전동기 모델

플랜트 부하의 대부분은 유도전동기이므로 과도기간의 유도전동기의 동특성을 자세히 파악하여 설계에 적용하여야 하므로 모델을 자세히 다룰 필요가 있다. 유도전동기의 기계적, 전기적 방정식은 다음과 같다. [7]

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-1}{Tdo'}[E - j(Xoc - Xlr)] - j2\pi fSE$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2H}(Pm - Pe) + D\,\omega_m$$

E : machine internal voltage
S : machine slip in pu
Tdo′ : rotor open circuit time constant in seconds
= (Xr+Xm)/2 πf Rr
Xlr : lock rotor reactance in pu
= Xs +XmXr/(Xm+Xr)
Xoc : open circuit reactance in pu
= Xs + Xm
f : system frequency (Hz)
Pm : mechanical power in pu
Pe : electrical input power in pu
It : mechanical terminal current in pu
D : damping factor
ω_m : motor speed in pu

유도전동기의 모델은 그 복잡도의 정도에 따라 축약등가모델(EQV), 등가회로 모델(CKT), 이중농형 등가회로 모델(DBL)을 모델로 구분한다.

EQV는 농형 유도전동기를 표현하기 위하여 테브난 등가회로를 사용한다. 회전자 R, X는 모터의 모든 속도에 대해 일정하다.

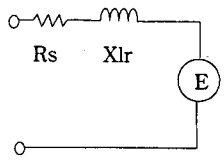

그림1 축약등가 모델 (EQV)

CKT는 유도전동기의 표준 모델로서 고정자회로, 회전자 회로, 및 여자회로를 포함한다. 모터 속도 변화에 따라 저항과 리액탄스가 변한다.

Xr = [Xrlr (S-Sr) / Xrfl + 1 - S] Xrfl / (1-Sr)

Rr = [Rrlr (S-Sr) / Rrfl + 1 - S] Rrfl / (1-Sr)

Sr = slip at rated speed

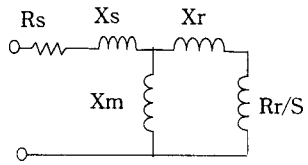

그림 2. 등가회로 모델 (CKT)

DBL은 각 농형의 저항과 리액탄스는 모든 속도에 대해 일정하다. 그러나 2개의 회전자회로의 등가 임피단스는 모터속도에 대해 비선형이다.

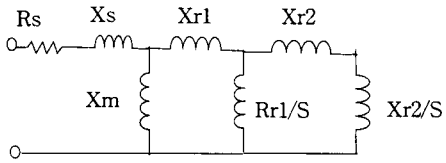

그림 3. 이중 농형 모델 (DBL)

2.2 사례연구

플랜트 내의 유도전동기 부하 모델 표현을 달리함에 따른 안정도 해석 결과의 차이를 비교 평가하기 위하여 다음과 같은 사례연구를 하였다.

2.2.1 사례 대상 계통

사례 연구에 사용된 전력계통은 중동지방의 실제 발전 플랜트 설계에 사용된 시스템으로서 3개의 가스터빈 발전기와 발전기 별로 각각 연결된 400/15kV 승압변압기, 15/6.9kV 소내 보조 변압기, 6.6/0.4kV 소내 배전용 변압기로 구성된다. 각 6.6kV 와 0.44 kV 모선에는 소내 보조기기와 유도전동기가 연결되어 있다. 간략한 단선도는 그림4와 같다. [8]

2.2.2 최대 허용 고장제거 시간

안정도 해석 시 계통 보호계전 시스템의 적정성을 확인하기 위하여 최대 허용 고장제거시간 (critical fault clearing time)을 계산하여야 한다. 발전기 단에 3상 단락사고가 발생하였을 경우 유도전동기를 constant kVA 모델과 등가회로 모델을 적용하였을 때 각각의 고장제거시간의 차이를 해석하여 비교하였다.

- case 1 :고장제거시간 0.345 초, constant KVA model 적용
- case 2 :고장제거시간 0.345 초, 등가회로모델 적용

계산 결과를 보면 같은 고장제거 시간에서 constant kVA 모델을 적용하는 경우는 계통이 안정하나 CKT 모델 적용 시는 계통이 불안정하게 계산됨을 알 수 있다.

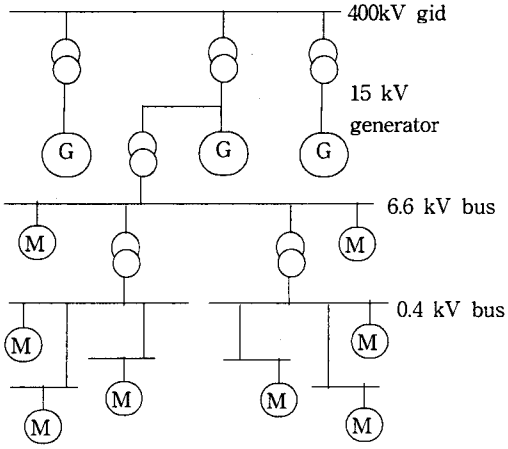

그림 4. Simplified One Line Diagram

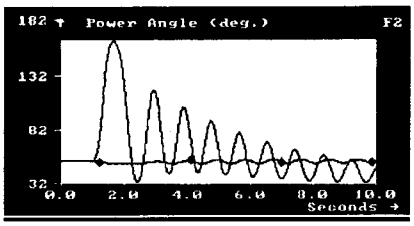

그림 5. case 1 constant kVA model 적용 시 위상각

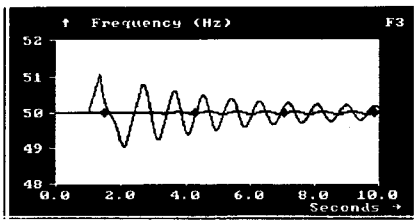

그림 6. case 2 constant kVA model 적용 시 주파수

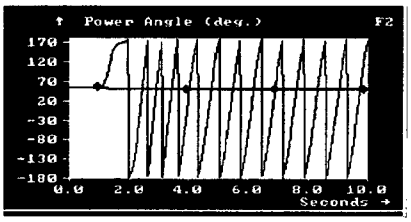

그림 7. case 2 등가회로 model 적용 시 위상각

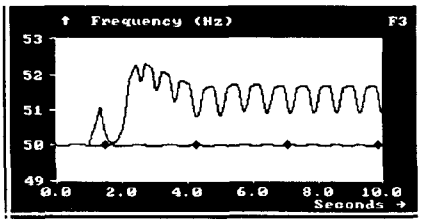

그림 8. case 2 등가회로 model 적용 시 주파수

2.2.3 유도전동기의 동특성 비교

플랜트 내 모선의 단락사고 발생 및 고장제거 시 유도전동기는 재 기동하여 많은 돌입전류를 흐르게 하므로 이에 의한 전압변동과 전동기의 회생여부를 확인하여야보호계전 시스템 등 관련 설계를 정확히 할 수 있다. 발전소 구내의 6.6kV 모선 단락사고 시 유도전동기 모델의 차이에 따른 동특성 차이를 해석하여 비교하였다.

- case 3 : 고장제거시간 0.344 초, EQV 모델 적용
- case 4 : 고장제거시간 0.344 초, CKT 모델 적용
- case 5 : 고장제거시간 0.344 초, DBL 모델 적용

계산 결과의 비교하면 다음과 같다.

DYE model 적용 시 :
전압회복 t=2sec에서 V=0.987 pu
max. slip = 16.86 % max. cur.=1368.8 A

DYC model 적용 시 :
전압회복 t=2sec에서 V=0.908 pu
max. slip = 16.09 % max. cur.= 1570.4 A

DBL model 적용 시 :
전압회복 t=2sec에서 V=0.822 pu
slip = 모터 정지(die) max. cur. = 1589.7 A

이 결과에서 보는 바와 같이 유도전동기의 모델 표현을 달리함에 따라 고장제거 후 모선의 전압회복 특성과 전동기 속도 회복 특성이 매우 달라진다. 플랜트의 전압계전기와 단락 보호계전기의 설계 기준과 방법을 선정함에 있어 안정도 해석을 위한 유도전동기 모델링의 정확성에 신중을 기하여야 한다는 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 프랜트 설계 단계에서 안정도 해석을 행함에 있어 부하모델의 차이가 안정도 해석 결과에 미치는 영향을 비교 평가하였다.

플랜트 부하의 대부분인 유도전동기 모델을 달리 적용함에 따라 안정도 해석 시 최대 허용 고장제거시간이 매우 다르게 나타난다는 것을 보여 주었다. 또한 유도전동기의 모델 표현을 달리함에 따라 고장제거 후 모선의 전압회복 특성과 전동기 속도 회복 특성이 매우 달라짐을 보여 주었다.

동특성 해석 결과를 산업플랜트의 보호계전 시스템 설계 기준 선정에 적용하고자 할 때, 유도전동기 모델 적용에 있어 정확성을 기하여야 보호계전 시스템 설계 상 오류를 범하지 않을 수 있음을 보여 주었다.

[참 고 문 헌]

[1] SKM Analysis, Inc. "Power Tools for Windows", May 1988.
[2] Operation Technology Inc.,"Electrical Transient Analyzer Program Computer User Guide" 1983-1994.
[3] Koepfinger and et. al. "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power Systems Analysis", p. 61 - p. 114, 1990.
[4] Kent, M.H., et al. "Dynamic Modelling of Loads in the Stability Studies", IEEE Trans. PAS, May 1969.
[5] Iliceto, F., and et al. "Behaviour of Loads During Voltage Dips Encountered in Stability Studies - Field and Laboratory Tests", IEEE Trans. PAS, May/Apr 1973.
[6] IEEE COMMITTEE REPORT, "System Load Dynamics - Simulation Effects and Determination of Load Constants", IEEE Trans. PAS, Mar/Apr 1973.
[7] Arrillaga, J. and et al., "Computer Modelling of Electrical Power Systems", p. 265 - p. 271, John Wiley & Sons, 1983.
[8] 김봉희, "Transient Stability Study and Station Start Study for the Repowering of Jebel Ali Power and Desalination Plant D Phase II, Dubai Electricity and Water Authority", 명지전문대학 산업기술연구소 보고서, 2000년 3월.

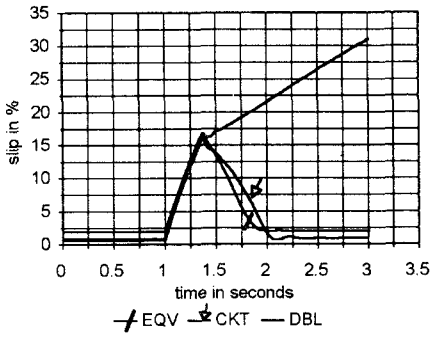

그림 9. 유도전동기 slip 비교

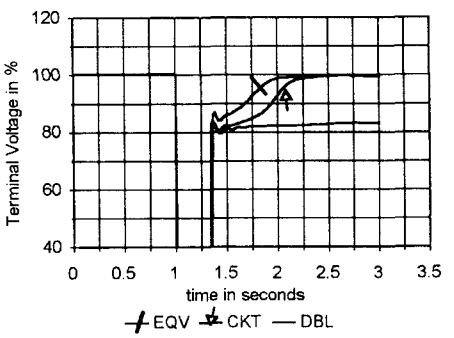

그림10. 유도전동기 단자전압 비교

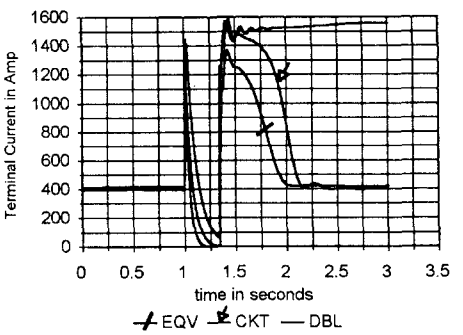

그림11. 유도전동기의 단자전류 비교