

독립계통에서 유도전동기 부하의 기동시 발전기의 안정적 부하추종에 관한 연구

(Study on Load Following Characteristics of Generators during Start-up
of Induction Motor Load in Isolated System)

신호전* · 허재선 · 김재철**

(Ho-Jeon Shin · Jae-Sun Huh · Jae-Chul Kim)

Abstract

Recently, not only in the Middle East and Southeast Asia but in African area, too, industrial plant construction is being actually done. But unlike in Korea, a lot of them are small-scale isolated industrial plants. And because of the characteristics of industrial plants, induction motors' load forms a large part. The influence of stability resulted from the maneuver and operation of induction motors' load may lead to serious result in the isolated system. This study analyzed it through mathematical modeling on induction motors' maneuver phenomena in the isolated system, realized a case system with the E-TAP program, and simulated load follow performances according to the control variables of a generator inside the isolated system.

Key Words : Induction Motor, E-TAP, Industrial Plants, Isolated System

1. 서 론

본 논문은 독립계통의 유도전동기의 기동 및 재기동에 대한 발전기의 전력 추종 및 제어 문제를 다룬다. 주 전력계통과 연결된 산업 플랜트는 실질적으로 기준 전압 확보를 위한 동적모터 성능연구만으로 안정한 전력시스템 운영이 가능하다. 그러나 우리나라와

는 달리 해외 산업 플랜트의 경우 독립계통에서 부하에 전력을 공급하는 경우가 비일비재하다. 이러한 경우 사고에 따른 발전기 탈락이나 부하의 급격한 증가 시 낮은 전압 조건에서 유도전동기 부하의 무효전력 수요는 기하급수적으로 증가한다. 고정 커패시터로부터의 무효전력 공급은 실질적으로 전압과 함께 감소한다. 따라서 발전기 등의 동적 무효전력 지원은 매우 중요하다. 동적 무효전력을 공급하는 발전기의 제어 동작의 효과를 확인하고 제어변수를 선정하는 것이 독립계통의 플랜트계통 설계단계에서 가장 중요한 부분이다. 설계초기의 발전기 및 부하의 파라미터에 대한 정보부족으로 상세한 제어변수 선정은 현실적으로 한계가 있다. 대부분 발전기 공급사의 데이터를 그대

* Main author : Ho-Jeon Shin, JoEngineering Corp.

** Corresponding author : Jae-Chul Kim, Soonsil University.

Tel : 02-6972-1401, Fax : 02-6972-1406

E-mail : mail@joeng.co.kr

Received : 2015. 1. 7

Accepted : 2015. 3. 2

로 사용하지만 시운전이나 운전 중이라도 시스템의 다양한 운영 시나리오에 맞는 제어변수를 선정하여 적용하는 것이 바람직하다.

산업플랜트와 관련된 기존연구에서는 계통연계형 플랜트에 대한 동적모의 및 계통 해석이 대부분이었다. 참고문헌[1-2]에서는 계통에 연계된 산업플랜트의 부하에 따른 응답특성, 과도안정도 등을 연구하였다. 그러나 증가하는 해외 플랜트의 독립계통에 대한 해석은 연구사례가 희소하여 해외시장 개척시 어려움이 많았다. 본 논문은 이러한 독립계통으로 구성된 플랜트시스템에 대한 응답특성을 분석하고자 하였다. 본 논문의 구성은 2장에서는 단독 전원으로 구성된 플랜트의 일반적인 구성 요소를 검토하고 이에 대한 등가 모델에 대해 정리하였다. 그리고 3장에서는 E-TAP 프로그램을 이용하여 사례연구에 대한 등가모델을 구성하고 유도전동기 부하의 기동 및 정지에 따른 발전기 출력 특성을 모의하였다. 본 논문에서 사용한 E-TAP 프로그램은 최근 산업플랜트에서 널리 사용되는 범용적인 프로그램으로 전력시스템 전체 구성기의 파라미터를 고려하여 모의할 수 있다는 장점이 있다.

2. 단독 전원 플랜트의 구성 및 등가 모델

2.1 산업플랜트의 등가모델 구성

산업 플랜트의 부하는 크게 정지형 부하, 동기 전동기 및 유도 전동기로 구성된다. 다양한 특성을 지닌 부하를 각각 세밀하게 모델로 표현하여 응답특성을 해석하기란 매우 어렵고 비효율적인 방법이다. 그러나 부하의 대부분이 유도전동기로 구성되어 있다고 가정하면 이들의 특성을 포함한 플랜트 전체를 통합 모델(Aggregate model)로 간단히 표현하여 해석할 수 있다[3]. 그림 1은 계통에 연계된 경우 플랜트의 전체 시스템을 개념적으로 표현한 통합모델이고, 그림 2는 플랜트 전체 통합모델에 대한 임피던스 표현이다. 여기서 G 와 B는 정지형 부하를 의미하고 유도전동기 부하는 H, R_s, X_l, X_m, R_r, S₀로 등가화해서 표현할 수

있다. 이와 같이 구성되는 플랜트에 대한 상태 방정식을 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[3].

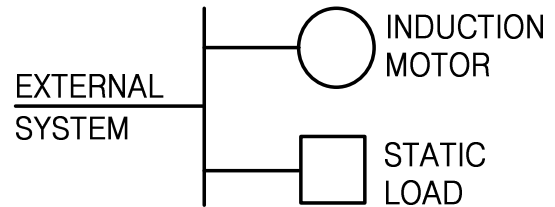


그림 1. 플랜트 통합모델
Fig. 1. Plant aggregate model

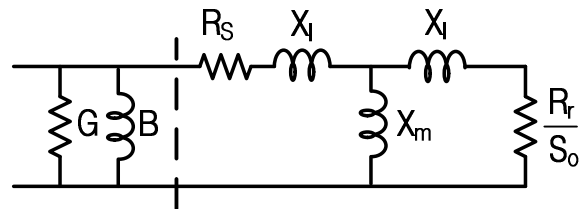


그림 2. 독 전원 플랜트의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of the isolated power plant

$$\Delta \dot{X} = A\Delta X + B\Delta u \tag{1}$$

$$\Delta y = C\Delta X + D\Delta u$$

$$\text{여기서 } \chi = \begin{bmatrix} v'_m \\ s \end{bmatrix}, u = \begin{bmatrix} v_{d0} \\ v_{q0} \end{bmatrix}, y = \begin{bmatrix} P_0 \\ Q_0 \end{bmatrix}$$

상기 식(1)은 정상상태 해석을 위하여 작은 외란을 무시하고 선형화한 플랜트를 시스템 해석을 위해 전형적인 상태방정식으로 표현한 것이다[3]. 여기서 v'_m 는 유도전동기의 내부 유기전압, s는 슬립, v_{d0}, v_{q0} 는 각각 유도전동기의 d축, q축 초기전압, P₀, Q₀는 각각 유도전동기 초기 유효, 무효전력을 나타낸다.

2.2 산업플랜트 발전기의 등가 모델

산업 플랜트 부하에 전력을 공급하기 위한 발전기 가속시 발전기의 동작은 동요방정식(swing equation)으로 식 (2)로 표현한다. 그리고 발전기의 출력제어를 위한 제어블럭다이어그램은 그림 3과 같이 구성할 수

있다. 여기서 H 는 관성모멘트, δ 는 회전체의 각 변위, T_m 은 발전기 기계적 토크, T_e 는 발전기 전기적 토크를 의미한다[4-5]. 발전기 각속도 변위($\Delta\omega_r$)는 발전기 정격 각속도(ω_0)와 회전자 각속도(ω_r)의 차이로 표현된다[6].

$$H \frac{d^2\delta}{dt^2} = T_m - T_e \quad (2)$$



그림 3. 전력방정식의 블록다이아그램
Fig. 3. Block-diagram of power swing equation

그림 4는 스팀터빈의 출력제어를 위한 가버너 제어 블록도로서 터빈 모델을 속도 조정 루프와 결합시키는 형태이다. 식 (3)은 터빈 출력의 변동에 대한 간략화된 모델이다[6].

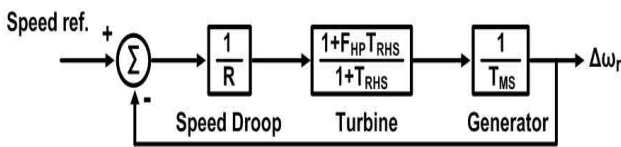


그림 4. 스팀터빈의 가버너 제어블록다이아그램
Fig. 4. Control Block-diagram of the steam turbine

$$\frac{\Delta T_m}{\Delta V_{cv}} = \frac{1 + F_{HP} T_{RHS}}{1 + T_{RHS}} \quad (3)$$

- F_{HP} : 가열기에 의해 발생된 터빈 토크의 비율
- T_{RHS} : 재가열기의 시정수
- T_{MS} : 터빈의 총 발생 전기적 토크(p.u.)
- T_{MCS} : 터빈의 총 발생 기계적 토크(p.u.)

2.3 유도전동기 부하의 등가 모델

유도전동기 모델의 표현은 과도기간의 동특성을 표

현하기 위하여 축약등가모델, 등가회로 모델, 이중농형 등가회로 모델로 구분할 수 있다. 이중에 본 논문에서 독립계통의 동적모의를 위해 등가모델로 선정하고 모의하였다. 유도전동기의 기계적, 전기적 방정식은 각각 식 (4)와 (5)로 표현할 수 있다[7-8].

$$\frac{dE}{dt} = \frac{-1}{T_{do}} [E - j(X_{co} - X_{lr})] - j2\pi f S E \quad (4)$$

$$\frac{dS}{dt} = \frac{1}{2H} (P_m - P_e) = D\omega_m \quad (5)$$

- 여기서 $T_{do} = (X_r + X_m)/(2\pi f R_r)$,
- $X_{lr} = X_s + X_m * X_r / (X_m + X_r)$,
- $X_{co} = X_s + X_m$
- E : 전동기 내부전압
- S : 전동기 슬립(p.u.)
- T_{do} : 회전자 개방회로 시정수(sec)
- X_{lr} : 구속회전자 리액턴스(p.u.)
- X_{co} : 개방회로 리액턴스(p.u.)
- f : 시스템 주파수(Hz)
- P_m : 기계적 출력(p.u.)
- P_e : 전기적 입력(p.u.)
- D : 댐핑 계수
- ω_m : 전동기 각속도(rad/sec)

3. 사례연구를 통한 발전기 부하 추종 특성 분석

3.1 모의계통 구성

산업플랜트 부하의 대부분은 정지형 부하와 유도전동기 부하로 구분할 수 있으며, 특히 유도전동기 부하는 기동전류가 커서 시스템의 전압에 악영향을 줄 수 있기 때문에 일반적으로 적용하는 그룹별 기동으로 모의하였다. 그리고 본 논문에서는 제어변수가 발전기 부하추종성에 미치는 영향을 분석하기 위해 E-TAP 프로그램을 활용하여 그림 5와 같이 임의에 산업플랜트에 대해 부하그룹화를 진행하고 모의 계통을 구성하였다. 모의 계통에서 발전기의 여자기와 가

버너는 IEEE STD.000의 ST-1모델, ST 모델을 각각 적용하여 구성하였다. 그림 6은 가버너 ST 모델에 대한 제어블럭도이다[9]. 제어블럭도에서 Kv는 가버너의 droop과 관련된 상수로써 Kv의 변화로 인한 발전기의 부하 추종특성의 변화를 모의하였다.

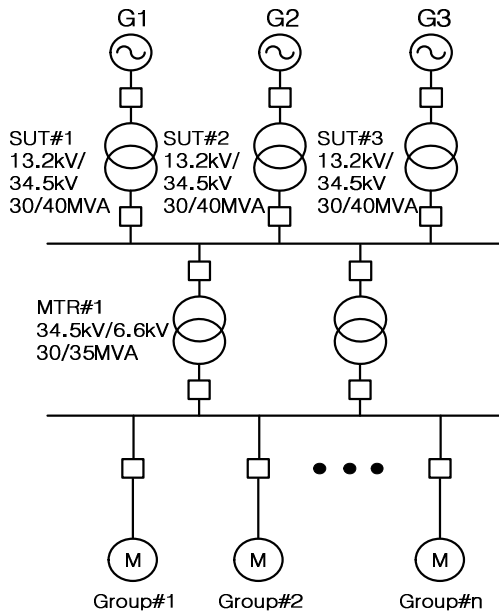


그림 5. 사례연구 계통 구성도
Fig. 5. Configuration of the case study network

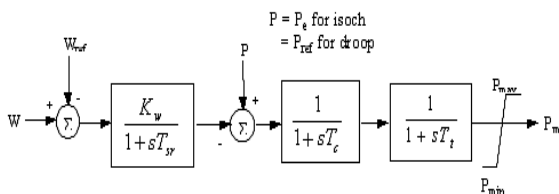


그림 6. 가버너 제어 블록 다이어그램
Fig. 6. Block diagram of governor control

그룹은 부하의 특성 및 프로세스에 따라 용량 및 기동시간을 고려하여 선정한다. 그리고 발전기의 역률은 지상역률 0.8로 가정하였다. 지상역률 0.8은 발전기의 운전한계 최대역률로써 가장 최악조건을 모의하기 위해 선정하였다. 다양한 운전조건이 있는 산업 플랜트 부하의 대부분인 유도전동기들은 모선의 기준전압 유지를 위해 프로세스에 따라 그룹별 기동을 한다. 본 논문에서는 표 1에서와 같이 그룹 1의 2,700kW 4sec

기동에서 그룹 8의 792kW 4sec 기동까지 발전전력의 10%/sec 이내의 8단계 그룹으로 기저부하 13,833 kVA 운전상태로 가정하였다. 이는 모두 발전기 허용 과속도 범위(110%)에 만족한다.

표 1. 전동기 그룹별 기동용량 및 기동시간
Table 1. load parameter for induction motor groups

명칭	기동용량	기동시간(sec)	비고
기저부하	13,833(kVA)		static load
그룹 1	2,700(kW)	4.0	motor load
그룹 2	2,700(kW)		
그룹 3	1,950(kW)		
그룹 4	1,170(kW)		
그룹 5	1,192(kW)		
그룹 6	1,210(kW)		
그룹 7	1,020(kW)		
그룹 8	792(kW)		

3.2 모의 결과

그림 7과 8는 각각 부하의 증가와 감소에 대해 발전기의 부하추종특성의 분석을 통해 비교한 것이다. 부하의 증가 및 감소는 표 1의 부하구성 및 기동시간을 기반으로 단계적 변화로 가정하고 제어변수에 따른 응답특성을 분석하였다.

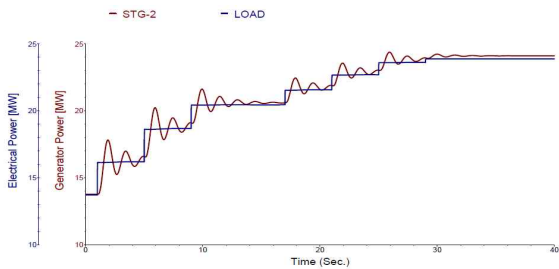
먼저 부하가 단계적으로 증가할 경우, 발전기 가버너의 제어변수를 조정함으로써 그림 7의 결과와 같이 부하추종 응답특성의 overshoot과 settling time 측면에서 상당한 개선효과를 나타냄을 확인할 수 있다. 특히 settling time의 경우 2sec 이내에 정상상태에 도달하였다. 그리고 30sec 이후, 제어변수 조정 전의 모의 결과에서 발생하는 발전출력과 부하간의 오차에 대해 제어변수를 조정함으로써 오차가 줄어들었다.

부하의 단계적 감소에 대한 발전기 출력특성의 경우 settling time 및 정상상태 오차 측면의 확실한 개선효과는 없었지만, overshoot 측면에서 개선효과를 확인할 수 있었다. 독립계통에서의 부하의 감발은 계통연계형 산업 플랜트보다 더욱 민감한 억제요소가 많으

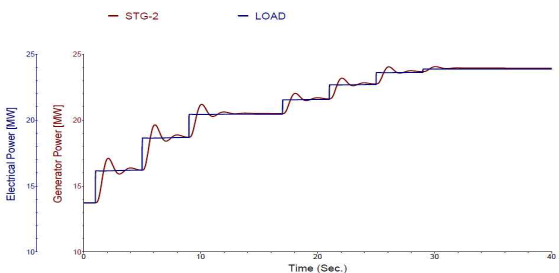
므로 신중히 검토하여야 한다. 일반적으로 발전기 거버너 제어루프에서 Kv의 값은 4~8% 범위를 갖는다. 그림 9는 부하추종성능 개선을 위하여 시정수의 영향은 적으므로 일정하다는 가정 하에 Kv값 2~8% 범위를 단계별 상향조정하여 프로그램 모의한 결과 그래프이다. 그 결과 Kv를 기존 값 4%에 비해 3% 상향조정된 7%에서 가장 적절한 값으로 부하추종성능이 개선됨을 확인할 수 있었다.

4. 결 론

본 논문에서는 단독 운전하는 플랜트를 정지형 부하, 전동기 부하, 발전기의 등가모델로 구성하고 각각의 모델에 대해 제어방정식으로 표현하였다. 그리고 간단한 사례 계통을 구성하고 부하의 변동에 대해 발전기출력의 변동을 검토하였다. 그리고 발전기의 제어변수를 조정함으로써 부하 추종 특성이 개선됨



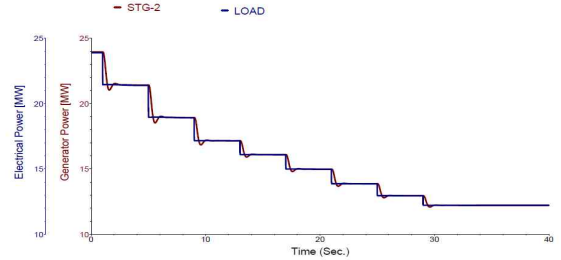
(a) 제어변수 조정 전 단계별 부하증가시 부하와 발전출력 파형



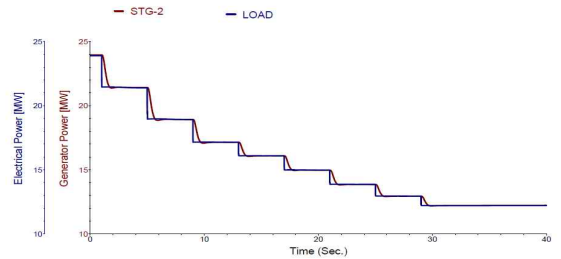
(b) 제어변수 조정 후 단계별 부하증가시 부하와 발전출력 파형

그림 7. 부하 증가에 대한 제어변수 조정 전/후 발전기의 부하추종 특성

Fig. 7. Load following characteristic of generators according to control variable for load increment



(a) 제어변수 조정 전 단계별 부하감소시 부하와 발전출력 파형



(b) 제어변수 조정 후 단계별 부하감소시 부하와 발전출력 파형

그림 8. 부하 감소에 대한 제어변수 조정 전/후 발전기의 부하추종 특성

Fig. 8. Load following characteristic of generators according to control variable for load reduction

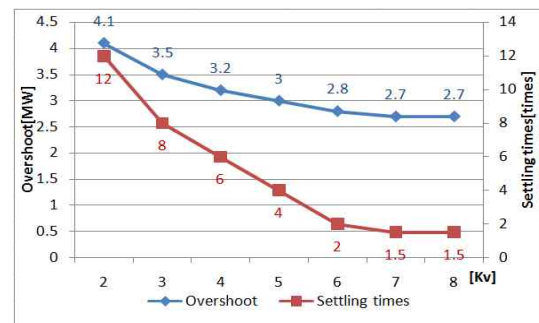


그림 9. 제어변수에 따른 응답특성 분석

Fig. 9. Response characteristics analysis according to control variable

을 확인하였다. 이는 독립계통 플랜트 연구의 좋은 참고자료가 될 것으로 생각된다. 향후 연구에서는 최적의 부하추종 특성을 위한 제어변수 선정방안에 대해 진행하고자 한다. 뿐만 아니라 모의결과를 실제 현장시험(Field Test)을 통해 검증이 필요할 것으로 사료된다.

References

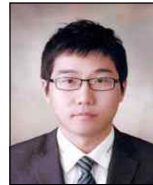
- [1] F.Iliceto, A.Ceyhan, G.Ruchstuhl, "Behavior of loads during voltage dips encountered instability studies. Field and Laboratory Tests", IEEE Winter Power Meeting, New York, 1975, p. 2470 - p. 2476.
- [2] MAURICE H. KENT and WAYNE R. SCHMUS, et al., "Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies" IEEE Trans, Power Syst, Vol. PAS-88, No 5, MAY 1969.
- [3] Graham J. Rogers, John Di Manno, Robert T.H. Alden, S.M., "AN AGGREGATE INDUCTION MOTOR MODEL FOR INDUSTRIAL PLANTS", IEEE Trans, Power Syst. Vol. PAS-103, No. 4, p. 683-p. 690, April 1984.
- [4] V Chuvychin, N Gurov, S Rubcov, "Adaptive Underfrequency Load Shedding and Underfrequency Load Restoration System", Power Tech, 2005 IEEE Trans, Power Syst.
- [5] L.D.Sterninson, "Transient processes during power system frequency and power control", Moscow, Energija 1975, 216 pp.
- [6] Kundur., Power System Stability and Control, p. 128 - p. 136, p-426-428.
- [7] Arrillaga, J. and et al., Computer Modelling of electrical Power Systems, p.284 - p.288, John Wiley & Sons, 1983.
- [8] Bong-Hee Kim, "An Evaluation on Change in Power System Stability Analysis Result due to Difference on Load Model", KIEE Conference, 2000. 7.
- [9] Electrical Transient Analysis Program Guide 12.5, 2014.

◆ 저자소개 ◆



신호전(申浩傳)

1967년 2월 05일생. 2005년 경기공업대 전자통신과 졸업. 2011년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 숭실대 전기공학과 박사과정. 발송배전 기술사.



허재선(許宰善)

1985년 1월 23일생. 2003년 숭실대 전기공학부 졸업. 2011년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
E-mail : jasonh@ssu.ac.kr



김재철(金載哲)

1955년 7월 12일생. 1979년 숭실대 전기공학과 졸업, 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988년~현재 숭실대 전기공학부 교수. 본 학회 회장.
E-mail : jckim@ssu.ac.kr