ISSN 1975-8359(Print) / ISSN 2287-4364(Online)
The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 65, No. 1, pp. 200～207, 2016
http://dx.doi.org/10.5370/KIEE.2016.65.1.200

독립계통 정유・화학플랜트의 안정도를 고려한 정격전압 결정에 관한 연구

A Study on the Determination for Rated Voltage Considering the Stability in the Refinery and Chemical Plant by Isolated Power System

신 호 전* · 조 만 영** · 정 인 성** · 김 진 석* · 김 재 철†
(Ho-Jeon Shin · Man-Young Cho · In-Sung Chung · Jin-Seok Kim · Jae-Chul Kim)

Abstract - Nowadays, it is a global trend to build refinery or chemical plants with an isolated system in a place distant from the center of a city. In the refinery or chemical plants equipped with an isolated system, induced motors mostly take the load, and the scale of high-voltage electric motors reaches from several kW up to several MW. Therefore, it is needed to examine the effects of electric motors on the power system closely in the stages of planning and designing a plant to build a stable power system. This study is aimed to investigate how to decide rated voltage in consideration of stability which has not been considered in the stages of planning and designing so far in order to secure stability for the power system.

Key Words : Isolated system, Load flow, Short-circuit current, Induction motor, Inrush current, Transient stability

1. 서 론

글로벌 정유, 화학플랜트의 건설 방향은 독립된 전원계통에서 전력을 공급하는 플랜트 건설이 증가 추세이다. 이들 글로벌 플랜트는 주거 밀집지역에서 수백km 떨어진 원거리이기 때문에 선로손실이나 도전의 우려로 인하여 독립전원 계통의 정유, 화학플랜트 건설이 불가피하다. 이들은 해안가, 섬, 사막, 고원지대 등에 건설되어 전력 발전 및 부하를 on-site 방식으로 공급 및 소비하고 있다. 또한 전력용량은 수 MW에서 수 GW로 중.대형 규모이고, 지리적, 환경적 조건과 부하의 종류가 전력시스템 전체의 안정성에 큰 영향을 미친다[1-3]. 다양한 조건으로 구성되는 정유, 화학플랜트에서 전원의 구성은 신재생에너지원보다 가스 또는 스팀터빈을 이용한 단일 혹은 복합구성이 대부분이다. 또한, 부하는 크게 정지형 부하와 유도형 부하로 구분된다. 석유, 화학플랜트에서 대부분의 유도형 부하는 유도전동기로 기동시 큰 무효전력의 흡수로 전압강하가 크게 발생하고 계통 고장 및 외란에 의한 비상상태에서 무효전력 공급원의 역할로 고장전류를 크게 증가시켜 전력시스템에 위험한 상태를 발생한다. 따라서, 안정적인 플랜트 설계를 위하여 설계단계에서 전원구성 및 부하특성을 고려하여 전력시스템의 정격용량 및 전압을 선정할 필요가 있다[4-7].

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
* Dept. of Electrical Engineering, Soongsil University, Korea
** Jo-engineering co. Ltd., Korea
Received : August 10, 2015; Accepted : November 24, 2015

그 동안 진행된 정유, 화학플랜트의 설계방안은 전력회사에서 운영하는 전력계통과 연계된 상황에서 플랜트 설계시 전력조류와 단락용량 및 전동기 기동특성을 고려하여 플랜트의 정격설비 용량과 정격전압을 결정하였다.

그러나 최근 증가되고 있는 글로벌 정유, 화학플랜트는 독립된 전원계통 플랜트로 전원에서 공급되는 유・무효전력이 제한되어 부하 변화에 따라 기존 설계 방안에서 검토된 영향과 다른 결과를 나타낸다. 따라서, 계통의 안정성이 취약해진 독립된 정유, 화학플랜트에 대하여 전력시스템 구상 및 설계 초기단계에서 안정도를 추가적으로 분석할 필요성이 출현되었다[8-12].

본 논문에서 독립된 정유, 화학플랜트에서 안정성이 확보된 전기설비의 정격용량 및 정격전압을 결정하기 위하여, 전력시스템 구상 및 설계단계에서 전력계통과 안정도의 상관성 분석 방식으로 정격전압 결정에 관한 새로운 알고리즘을 제안하였다. 또한 모의 계통을 구성하고 제안한 알고리즘 적용에 따른 효과를 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

2. 본 론

산업플랜트 구성요소의 등가모델은 발전원과 부하로 구분하여 발전원의 해석은 미분방정식, 부하계통은 대수방정식으로 해석한다[13-15]. 부하계통은 선형모델로 근사화하고 상태변수를 도입하여 특성을 분석한다[16, 17]. 본 논문에서 제안하는 안정도를 고려한 시스템의 정격전압 결정 방안(Determination voltage considering the reliability and stability : DVRS)은 기존 정유, 화학플랜트의 설계방안인 전력시스템의 정격전압 결정을 위한 전

Copyright ⓒ The Korean Institute of Electrical Engineers
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/)which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

력조류 및 단락용량 분석을 기반으로 한다[18, 19]. 그러나, 기존 설계방안과 달리 독립된 발전원의 발전용량 제약으로 전력시스템의 발전기에 대하여 안정도에 대한 추가 분석이 필요하다.

그림 1은 독립전원 산업플랜트의 간략한 등가모델을 나타낸다. 발전원은 터빈, 신재생에너지원 등으로 다양하며, 부하는 산업용, 상업용, 주거용에 따라 구성 비율이 다소 차이가 있으나 정적 또는 동적부하로 크게 분류된다[20].

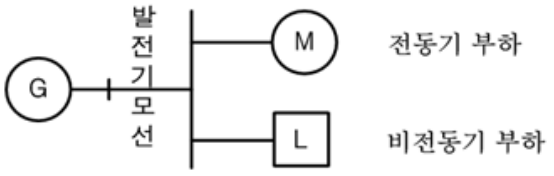


그림 1 독립전원 산업플랜트 등가모델.
Fig. 1 Equivalent models of an industry plant by isolated power.

2.1 독립전원 산업플랜트의 발전원과 부하 관계

독립전원 산업플랜트의 운영을 위하여 발전원과 부하의 구성이 중요하다. 전력시스템에서 m개의 발전기에 대하여 부하와 서로 균형이라면, 다음 식과 같이 표현된다[21].

$$\frac{d\delta_i}{dt} = \omega_1 - \omega_i \tag{1}$$

$$\frac{d\omega_i}{dt} = \frac{1}{M}\left(P_{mi} - \frac{E_i' U_i}{X_{di}'} sin(\delta_i - \theta_i)\right) \tag{2}$$

$$0 = P_i - \frac{E_i' U_i}{X_{di}'} sin(\delta_i - \theta_i) \tag{3}$$

$$0 = \frac{U_i^2}{X_{di}'} - \frac{E_i' U_i}{X_{di}'} cos(\delta_i - \theta_i) + Q_i \tag{4}$$

여기서, ω_1은 첫 번째 발전기의 각속도 [rad/s], ω_i는 i 번째 발전기의 각속도 [rad/s], M은 관성모멘트, P_{mi}는 i 번째 발전기의 기계적 출력 [P.U.], E_i'은 i 번째 발전기의 내부 유기전압 [P.U.], U_i는 i 번째 발전기의 단자전압 [P.U.], X'_{di}는 i 번째 발전기의 과도리액턴스 [P.U.], δ_i는 i 번째 발전기의 회전자 각도 [rad], Θ_i는 i 번째 발전기의 역률각 [rad], P_i는 i 번째 발전기의 유효전력 [P.U.], Q_i는 i 번째 발전기의 무효전력 [P.U.]이다.

식 (4)는 정상상태에서 발전원과 부하의 평형상태를 표현한다. ω와 δ는 발전기의 보조적 제어기 등 여러 가지 상태 변수에 따라 변화하지만, 과도안정도는 매우 짧은 과도상태에 대한 특성분석으로 제어기의 효과는 무시한다. 그러나, 과도상태에서는 왼쪽 항이 영(0)이 아닌 상태로 발전원과 부하 사이의 불평형에 대한 발전기 동적 특성을 검토할 필요가 있다.

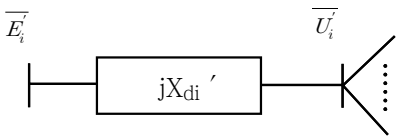


그림 2 발전원과 부하의 평형 모델.
Fig. 2 Balanced model of Generation source and load.

2.1.1 전력조류 및 단락전류 분석

산업플랜트에서 설비의 정격전압을 결정하기 위하여 전력조류 및 단락전류에 대한 분석이 필요하다. 전력조류 계산은 전력계통에 대하여 비선형 전력방정식으로 구성되어 한 번에 계산 할 수 없으며, 초기 값을 가정하여 근사 해를 계산하고 전력방정식에 대입하여 근사해와 오차를 비교하고 반복 계산법으로 오차를 최소화하는 해를 찾는 것이다[15. 21]. 이는 전력 공급 시설내의 발전기에서 생산되는 유·무효 전력이 전력계통으로 어떤 상태로 전송되며, 각 지점의 규정된 전압이 적정 값에서 유지되는지 확인 할 수 있어 가장 적합한 운용 방법 및 전력기기의 정격을 선정하는데 사용된다. 해석방법으로 뉴튼-랩슨 법과 가우스-자이델 법이 가장 대표적이다[15, 18, 19].

고장계산은 ANSI & IEEE C37, IEC 60909-0,1,2,3 및 IEC 61363 기준에 따라 계산한다. 이들은 고장계산 알고리즘, 계수소개, 기기들의 임피던스 산정방법, 지락고장 설명 및 독립계통에 대한 고장계산 기준을 제시한다. 특히 안정도에 영향을 미치는 과도 특성을 해석하기 위하여 초기 과도 단락전류와 과도 임피던스 크기를 고려한다.

고장전류는 횡축에 대하여 비대칭인 전류가 흐르며 이 전류는 대칭분 교류전류와 과도성분인(off-set) 직류전류로 구분된다. 고장전류에 포함되어 있는 직류전류는 회로정수(X/R비)에 따라 크기 및 시간이 경과함에 따라 감쇠하는 비율이 결정된다[14, 22]. 고장전류를 계산하기 위하여 시간에 따라 직축 차과도, 과도, 동기 리액턴스의 세 가지 성분이 설정된다. 직축 차과도 리액턴스는 사고 발생 후 첫 cycle 동안의 전류를 결정하며, 직축 과도 리액턴스는 사고 후 수 cycle내의 전류를 결정한다. 직축 동기 리액턴스는 사고 후 정상 상태에 도달했을 때 전류를 결정한다.

단락전류는 시간에 따른 변화 특성에 따라 I_k'', I_k', I_b 등으로 구분하여 전력설비의 정격용량, 정격차단용량 및 계전기 정정 등에 적용한다[22]. 또한 계통 사고시 고장전류 공급원으로 동기기, 유도기, 유도전동기 등이 있다. 단락전류 계산의 기본 식으로 식 (5)와 같이 표현된다.

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\,Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{3}\sqrt{R_k^2 + X_k^2}} \tag{5}$$

여기서, Ik″ = 초기 대칭 단락전류 (Initial symmetrical short- circuit current), Un은 정격전압, Rk는 계통 저항 성분, Xk는 계통 리액턴스 성분, c는 최대 단락 전류 및 최소 단락전류를 계산하기 위한 전압 계수이다.

이와 같은 조류계산 및 고장 계산은 전력계통을 구성하는 각 전력설비들의 전기적. 기계적 및 열적 강도를 고려하여 운전 방안 제안 및 적절한 전력설비의 정격용량 및 정격 단락용량을 선정을 위한 것이다.

2.1.2 대용량 유도 전동기 기동특성

정유, 화학플랜트에서 대용량 전동기의 기동방법은 대부분 직입기동으로 전동기 기동시 전류는 정격전류의 6~8배에 달한다. 전동기 기동전류는 돌입전류특성으로 정상성분과 과도성분으로 구분되며, 전동기 명판에 나타난 데이터를 이용하여 정상상태 성분을 구할 수 있다. 과도상태의 성분은 제작사의 자료를 참고하여 계산할 수 있으며, 각각에 대한 계산은 식 (6)~(8)을 통하여 가능하다.

$$i_{lr,ss} = \left|\frac{V_m}{Z}\right| \sin(ut - \theta_z) \tag{6}$$

$$i_{lr,tr} = \frac{V_m}{Z} e^{-\frac{R}{L}t} \sin(\theta_z) \tag{7}$$

$$i_{lr} = \frac{V_m}{Z} e^{-\frac{R}{L}t} \sin(\theta_z) + \frac{V_m}{Z} sin(\omega t - \theta_z) \tag{8}$$

여기서 $i_{lr,ss}$는 정상상태의 전류, $i_{lr,tr}$은 과도상태의 전류, i_{lr}은 회로에 흐르는 순시 전류이다. $R = Z_{in} \cos\theta_z$, $L = (Z_{in} \sin\theta_z)/(2\pi f)$, V_m은 최대 인가전압, Z는 회로의 등가임피던스이다[24, 25].

식 (8)은 과도성분과 정상성분의 합으로 돌입전류를 계산할 수 있으며, 그림 3과 같이 표현된다. 전동기 기동시 임피던스는 단락임피던스에 가까운 등가회로를 구성하여 과도성분과 정상성분의 임피던스가 매우 작아 큰 전류를 발생한다.

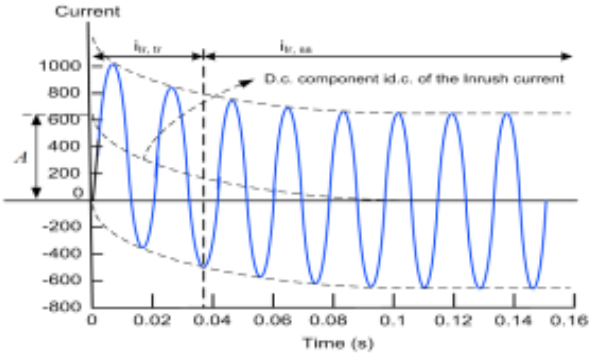


그림 3 전동기 구속회전자 돌입전류.
Fig. 3 Inrush current of motor restraint rotor.

독립계통의 정유, 화학플랜트에서 부하의 대부분은 대용량 전동기로 기동시 큰 돌입전류가 발생되고 이로 인하여 독립계통의 모선은 큰 전압강하를 경험한다. 다수의 전동기가 동시에 동작하면 돌입전류의 크기가 증가하고, 전압강하 또한 심각하게 발생하여 타 부하의 정지를 초래한다[24].

2.2 안정도를 고려한 정격전압 선정 방안

독립계통의 정유, 화학플랜트 설계시 그 동안 검토한 전력조류, 단락용량 및 전동기 기동특성에 의한 전압강하를 고려하여 정격용량을 결정하면 모선전압 6.6kV와 11kV에서 전압강하는 적합하였으나, 본 논문에서는 안정도를 고려할 경우 6.6kV는 전력공급에 문제가 발생하였다. 일반적인 계통 연계 산업플랜트의 경우 위상각 안정도가 산업플랜트 운영에 큰 영향을 미치지만 독립계통의 산업플랜트에서는 대용량 부하에 따라 유무효전력의 공급 및 흡수 능력이 취약하여 기존 설계 방안에서 검토된 영향과 다른 결과를 나타낸다. 따라서, 독립계통의 산업플랜트 설계는 전압강하와 안정도에 대한 추가적인 검토가 필요하다.

2.2.1 리액턴스 부하의 특성

각종 규모의 유도전동기로 구성된 산업플랜트는 그 자체가 리액턴스라고 할 수 있으며, 등가회로는 그림 4와 같이 R-L로 표현 가능하다. 리액턴스는 정상상태에서 등가적으로 단락회로를 구성하여 전력계통에 미치는 영향이 미미하지만, 외란시 인덕턴스 L에서는 자속의 연속성에 의해 자속과 전류가 갑자기 변화할 수 없는 특징으로 과도상태는 시간에 따라 전류 및 전압의 크기와 지속시간이 변화한다. 과도상태에서 리액턴스에 유기되는 전압은 식 (9)와 같이 기술한다.

과도상태에서 발생하는 모선 전압의 크기는 리액턴스의 전압강하에 따라 달라지며, 이는 전동기 기동시 발생하는 돌입전류의 크기와 비례한다. 또한, 돌입전류와 전압강하의 크기는 리액턴스의 크기에 따라 비례하여 산업플랜트의 전력계통 안정도에 큰 영향을 나타낸다.

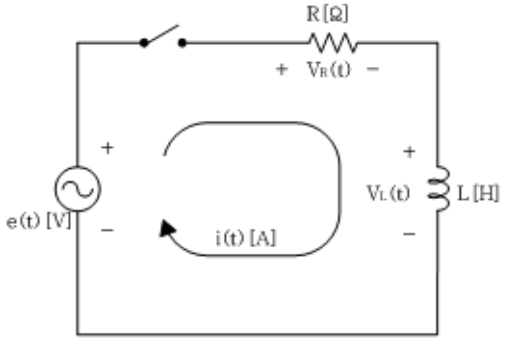


그림 4 산업플랜트의 등가회로.
Fig. 4 Equivalent circuit of industrial plants.

$$v_L = L\frac{di}{dt} = \frac{LE}{R}\frac{d}{dt}\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right) \tag{9}$$
$$= \frac{LE}{R}\frac{R}{L}e^{-\frac{R}{L}t} = Ee^{-\frac{R}{L}t}[V]$$

$$\Delta v = E - v_L = E - Ee^{-\frac{R}{L}t} = E\left(1 - e^{-\frac{R}{L}t}\right)[V] \quad (10)$$

2.2.2 전압과 안정도의 상관특성

참고문헌 [20]에 제시된 모선 전압과 부하 전력의 관계는 P = V_n으로 표현할 수 있으며, 산업플랜트의 유도전동기는 정전력 부하로 유효전력의 변화가 최소화되고 이에 따라 위상각의 영향도 미미하다. 그러나, 독립계통의 산업플랜트에서 공급되는 전력이 유한적이고 유도전동기 기동시 무효전력 공급이 정상상태보다 6~8배 정도 필요하여 전압이 크게 변동한다.

독립계통의 산업플랜트에서 외란시 공급전력(P')은 식 (11)과 같이 표현할 수 있다. E_A는 전원측 전압, E_B는 부하측 전압, X_A는 전원측 임피던스, X_B는 부하측 임피던스, X_F 는 고장점의 임피던스이며, Θ는 위상각이다.

$$P' = \frac{E_A E_B \sin\theta}{X_A + X_B + \frac{X_A X_B}{X_F}} \quad (11)$$

산업플랜트에 설치된 유도전동기에서 발생하는 전압강하의 크기를 고려하여 설계단계에서 부하측 전압(E_B)를 결정한다. 그러나, 외란시 부하가 요구하는 전력량은 부하측 전압에 영향을 받는다. 유도전동기의 전압강하 등에 의하여 결정된 부하측 전압(E_B)가 작으면 외란시 P'이 감소하여 전력계통에서 요구하는 최소 전력량을 만족하지 못하면 산업플랜트의 전력계통은 정지 상태에 이르게 된다.

일반적으로 산업플랜트는 정상상태에서 식 (12)와 같이 공급전력을 표현할 수 있다.

$$P = \frac{E_A E_B}{X_A + X_B}\sin\theta = P_m \sin\theta \quad (12)$$

정상상태도 외란시 전력공급 특성과 같이 부하측 전압에 영향을 받으며, 빈번한 기동 및 정지 기능을 갖는 부하는 전압변동의 영향을 미친다. 이때, 동요방정식에 의하여 공급전력과 부하전력 사이에 차이가 발생하였을 경우 발전기는 속도변화를 겪으며, $\frac{dP_G}{d\theta}$〈0일 경우 전력계통은 불안정해 진다. 이와 같이 부하측 전압의 변화에 따라 정상상태 전력(P)과 과도상태의 전력(P')가 영향을 받고 변화되는 전력의 크기(P, P')에 따라 계통은 안정하거나 불안정할 수도 있게 된다[23, 27]. 따라서, 안정적인 산업플랜트의 운영을 위하여 설계시 안정도를 고려하여 부하측 정격전압(EB)을 적절하게 선정하여야 한다[28].

2.3 안정도를 고려한 시뮬레이션 분석

정유, 화학플랜트에서 적절한 부하측 전압을 선정하기 위하여 그림 5와 같이 시뮬레이션을 모델링하고 안정도 분석을 통하여

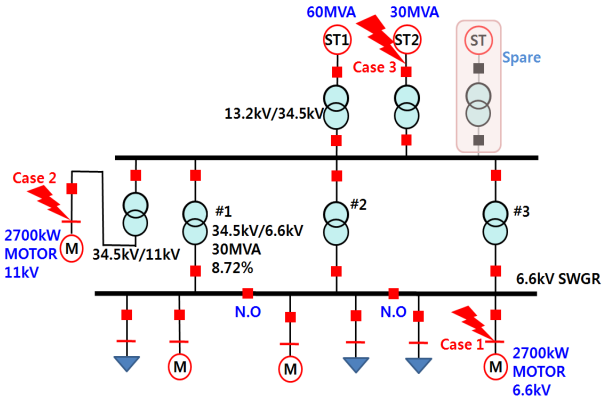


그림 5 독립전원계통 정유, 화학플랜트 모델.

Fig. 5 Models of refinery-chemical plant by Independent power system.

확인하였다.

독립계통의 정유, 화학플랜트 모델은 전원공급을 위한 동기발전기 및 승압변압기를 각각 2대, 소내용 변압기 3대, 정지형 부하와 기동중인 유도전동기 2대 및 부하전압에 따른 안정도 분석을 위한 6.6kV와 11kV로 각각 구성하였다. 자세한 구성 데이터는 표 1과 같다.

표 1 모의 계통 데이터.

Table 1 Simulation System data.

항목		데이터
전원		ST1 :13.2 [kV]/Xd″ 15%/60 [MVA] ST2 :13.2 [kV]/Xd″ 18.2%/30 [MVA]
변압기	승압용	13.2/34.5 [kV] / 15%
	소내용	34.5/6.6 [kV] / 11%
		34.5/11 [kV] / 11%
정지형 부하		7.073 [MVA]
운전 중 전동기 부하		33.354 [MW]
기동용 전동기 부하		6.6 [kV] /Xd″ 17.8% / 2,700 [kVA] 11 [kV] / Xd″ 17.8% / 2,700 [kVA]

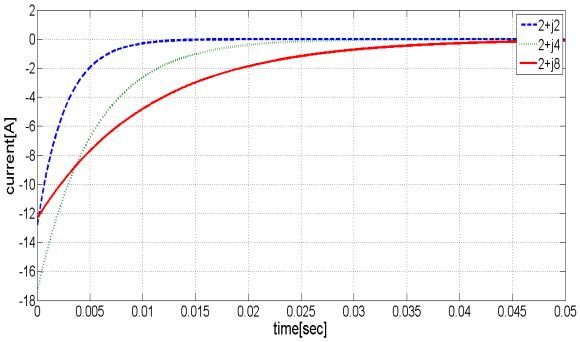
정유, 화학플랜트의 부하측 전압에 대하여 안정도를 검토하기 위하여 전동기의 전압과 고장 위치에 따라 분석하였다. Case1과 Case2는 전동기의 전압이 각각 6.6kV 및 11kV로 운전 중이며, 두 사례의 전동기는 각각 적용되어 모선에서 고장을 모의하였다. Case3은 발전기가 전동기의 전압이 6.6kV와 11kV인 사례에서 발전기 모선에 고장이 발생하였을 경우 전력공급에 대한 안정도를 검토하였다.

2.3.1 리액턴스 부하 변화에 따른 특성

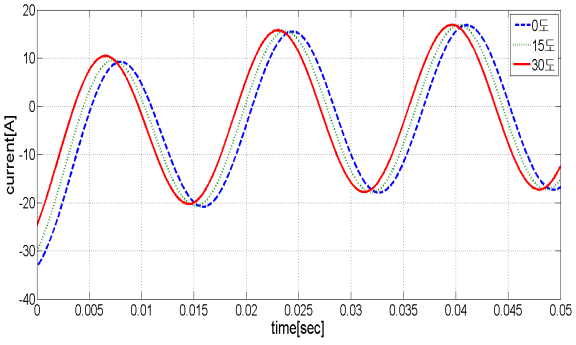
전기회로 적으로 등가화 된 정유, 화학플랜트는 그림 4와 같이

R-L회로로 구성할 수 있으며, 인덕턴스의 과도상태에 대한 전류 및 전압의 변화를 시뮬레이션을 통하여 검토하였다. 그림 4와 같이 구성한 시뮬레이션에서 전압은 100∠30°[V], 임피던스는 2 + j8[Ω], 전압 초기위상은 0°, 15°, 30°의 조건으로 하였다.

그림 6은 정유, 화학플랜트에서 리액턴스 부하가 전력계통에 영향을 끼치는 과도특성을 고려하기 위한 특성분석 결과를 보여준다.



(a) 전압 초기위상 변화 파형



(b) 리액턴스 크기 변화 파형

그림 6 전압 초기위상 및 리액턴스 크기 변화에 따른 과도특성 파형

Fig. 6 The transients waveform by the initial phase of various voltages and reactance values.

그림 6에서 (a)는 초기 전압위상에 따른 과도현상 분석 파형이며, 전압위상 0° 에서 부하 투입시 과도특성 변화가 가장 크게 된다. 또한 그림 6의 (b)는 전압은 100∠30°[V], 전압 초기위상 0°에서 리액턴스를 j2, j4, j8[Ω]로 변화하였을 경우의 파형으로 계통에서 리액턴스 크기가 증가할수록 과도지속 시간이 길어지는 것을 식 (8)과 함께 확인 할 수 있다.

이러한 현상에 의하여 리액턴스에 인가되는 과도상태의 전압도 증가하여 계통에서는 전압강하가 심각해진다.

2.3.2 전압과 안정도에 따른 분석 결과

독립계통의 정유, 화학플랜트에서 외란시 전동기 모선의 전압

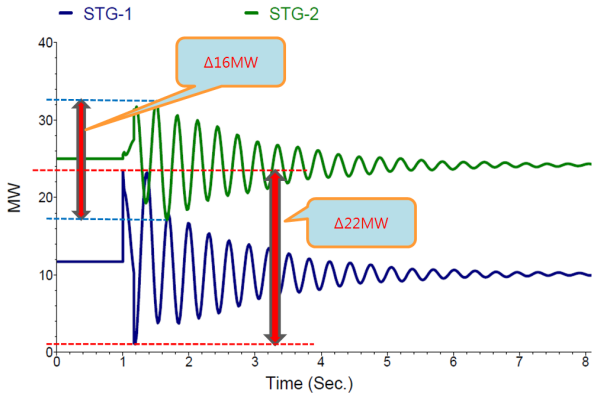


그림 7 Case 1에서 전동기 전압 6.6kV 시스템의 모선 고장에 따른 전원 공급.

Fig. 7 Power supply waveforms according to the bus-bar failure of the motor terminal voltage 6.6kV system in case 1.

에 따라 식 (11)에 제시된 공급전력이 영향을 받는다. 설계시 결정된 전동기의 모선 전압에 따른 공급전력을 분석하고 정유, 화학플랜트의 운영 여부에 따른 안정도를 분석하기 위하여 ETAP (Electrical Transient Analyzer Program)을 사용하였다.

전동기 전압에 따라 운전 중인 전동기의 모선 고장으로 건전부하에 대한 전원공급 발전기의 과도특성을 분석하였다. 모선 전압이 6.6kV 및 11kV인 구성을 각각 Case1, Case2로 구성하였으며, 각각 사례에 대하여 개별적으로 전동기를 구성하였다.

Case1은 6.6kV의 전압으로 구성된 전동기의 운전 중 모선에서 고장이 발생한 사례로 발전기의 전력공급에 대한 결과를 그림 7에 보여준다. 정상상태의 발전으로 ST1과 ST2는 각각 12MW, 25MW를 공급한다. 1초에 전동기 모선의 고장발생으로 발전기에서 과도현상이 발생하여 공급하는 전력이 22MW, 16MW의 범위로 진동하지만 발전기의 공급능력 범위로 시간이 지남에 따라 정상상태 범위로 수렴함을 확인할 수 있다.

Case2는 11kV의 전압으로 운전 중인 전동기 모선에서 고장이 발생한 사례로 발전기 전력공급의 결과를 그림 8에서 보여준다. 그림 7과 같이 정상상태의 운영을 나타내며, 1초에 고장발생시 발전기에서 과도현상으로 공급 전력이 진동하지만 역시 발전기의 공급능력 범위로 시간이 지남에 따라 정상상태 범위로 수렴함을 확인할 수 있다.

전동기 모선의 고장으로 발전기에서 대응하는 과도특성은 IEEE399 - 1997에 따라서 회전기계의 진동과 동요가 외란 후 6초 이내에 소멸되어 정상 운전 범위에 도달하여야 한다. 모선 전압 6.6kV와 11kV에서 전동기 모선 고장시 발전기의 공급이 6초 이내에 정상범위에 수렴하여 정유, 화학플랜트 설계에 적합한 전압을 보여준다.

Case3은 전동기의 전압이 6.6kV와 11kV인 사례에서 ST2발전기 모선에 고장이 발생하였을 경우 전동기 전압에 따라 발전기에서 공급 안정도 확보 여부에 의한 산업플랜트 운영 가능성을 검토하였다.

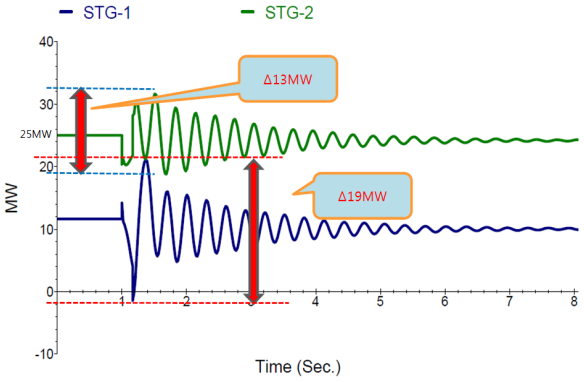


그림 8 Case 2에서 전동기 전압 11kV 시스템의 모선 고장에 따른 전원 공급.

Fig. 8 Power supply waveforms according to the bus-bar failure of the motor terminal voltage 11kV system in case 2.

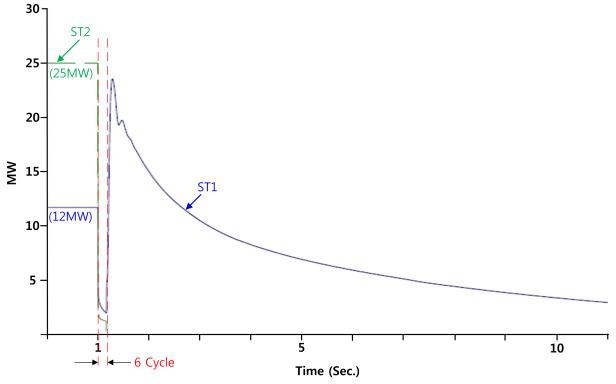


그림 9 Case 3에서 모선 전압 6.6kV 시스템의 ST2 모선 고장에 따른 보호기기 동작시 전원공급 특성.

Fig. 9 Power supply characteristics when protection devices operate according to ST2 bus-bar failure of bus voltage 6.6kV system in case 3.

그림 9는 전동기 모선 전압이 6.6kV인 계통구성에서 ST2 발전기 모선 고장에 따른 발전기 ST1의 공급 안정도와 보호기기 동작시 전원공급 특성을 보여준다. 정상상태에서는 ST1과 ST2의 각 발전기에서 각각 12MW, 25MW를 공급한다. 1초에 발전기 ST2의 모선에서 고장이 발생하였으며 보호기기 동작으로 6 cycle 후에 차단되어 0 MW을 출력을 나타낸다.

이때, ST2 발전기에서 무효전력이 공급되지 못하며, ST1 발전기는 전력계통에서 요구하는 무효전력 공급을 만족하지 못하여 식 (11)의 부하측 전압(E_B)가 전압강하로 공급전력을 확보하지 못하여 ST1의 발전기가 정지 상태에 이르는 결과를 보인다.

전압강하의 크기를 감소시키기 위하여 전동기 모선의 전압을 6.6kV에서 11kV로 승압하였을 경우 그림 10에서 각 발전기의 전원공급 특성을 보여준다. 그림 9와 동일한 동작이 수행되었을 경우 ST1 발전기는 ST2 발전기에서 공급하던 무효전력을 충분히 수용할 수 있었으며, 전력계통에서 요구하는 공급전력을 만족하였다. 이는 전동기 모선의 전압이 승압되면서, ST2로부터 요구하는 무효전력이 6.6kV보다 적으며, ST2 발전기의 차단시 발생하는 부하측 전압강하가 작게 발생하여 가능하다. 이러한 영향으로 ST1 발전기는 6 cycle 이후에 산업플랜트의 전력계통 부하가 요구하는 전력을 출력할 수 있으며, 정상상태를 회복하였다.

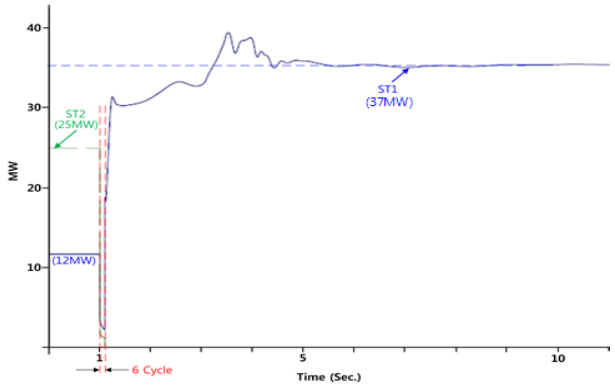


그림 10 Case 3에서 모선 전압 11kV 시스템의 ST2 모선고장에 따른 보호기기 동작시 전원공급 특성.

Fig. 10 Power supply characteristics when protection devices operate according to ST2 bus-bar failure of bus voltage 11kV system in case 3.

표 2 6.6 및 11kV 고압전동기 모선의 안정도 평가.

Table 2 Stability evaluation of 6.6kV and 11kV high voltage motors bus-bar.

		고압 전동기 전압	
		6.6 kV	11kV
LF [MVA]	ST1	11.7 + j14.5	11.6 + j14.9
	ST2	24.9 + j5.4	25 + j7.6
SC [kA]	ST1 2차측	4.42	4.42
	ST2 2차측	2.01	2.01
MS	전류	2.7+j13.4	2.8+j13.9
	전압	83.45%	84.82%
안정도		회복불가	회복가능

표 2는 산업플랜트에서 전동기 부하의 안정도 평가 여부의 결과를 보여준다. 6.6kV와 11kV 고압전동기 모선의 독립계통 화학플랜트에서 조류계산(LF), 단락용량(SC) 계산과 전동기 기동(MS) 특성 분석으로 정상상태의 해석을 통하여 유사한 결과를 보인다. 그러나, 전동기 부하의 모선 전압 크기에 따른 전력계통의 안정도를 평가한 결과 발전기 모선 고장시 6.6kV에서는 건전모선 발전기의 전력공급이 추종하지 못하여 중단되어 전체 계통이 정지하는 결과를 나타내었으며, 11kV에서는 건전모선 발전기의 공급전력이 진동 및 동요를 회복한 결과를 보여준다.

3. 결 론

본 논문에서는 독립 전력계통의 정유, 화학플랜트에서 두 가지 정격전압의 전동기를 상정하고 부하 정격전압을 결정하기 위하여 안정도에 관하여 연구하였다. 정유, 화학 플랜트의 대부분 부하는 리액턴스 부하로서 외란시 과도현상에 의한 전압강하의 크기나 지속시간이 길어진다. 특히, 이러한 영향으로 무효전력 공급이 유한적인 독립된 전력계통에서 외란시 전력계통 안정도 확보 유, 무를 결정하는 최소 공급전력은 전력계통의 여러 요소들 중에서 부하전압에 따른 영향이 크게 작용하였다. 그러므로 플랜트 구상 및 설계 단계에서 기존의 정격전압 결정을 위한 분석에 추가하여 안정도를 고려한 정격전압을 결정하여야 한다. 해외 산업플랜트는 고압기기의 정격전압 선택의 폭이 제한적이지 않다. 따라서, 본 연구는 향후 증가하는 다양한 조건의 독립된 해외 정유, 화학 플랜트 건설시 부하의 정격전압 결정에 있어서 플랜트의 발전 용량을 고려하여 계통운영에 적합한 정격전압을 선정함에 있어 참고 자료가 될 것이다.

References

[1] Bong-Hee Kim, “An Evaluation on Change in Power Syatem Stability Analysis Result due to Difference in Load Model”, KIEE summer conference, pp. 313-315, 2007.

[2] Bong-Hee Kim, “A Design of Load Shedding System Considering both Angular stability and voltage stability in industrial power system”, Trans. KIEE, vol. 54, no. 3, pp. 103-109, Sep. 2004.

[3] Young-Moon Park, Jong-Keun Park, Jae-Chul Kim, Bong-Hee Kim, “Anticipatory Generation Control of Fossil Power Plant for Large and Rapid Recurring Load Fluctuations”, Trans. KIEE, vol. 35, no. 6, pp. 237-245, Jun. 1986.

[4] Lee, W. J., Chen, M. S., and Williams, L. B., “Load model for stability studies”, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-23, no. 1, pp. 159-165, Jan. 1987.

[5] Bong Hee Kim, “power System Stability Analysis on Petrochemical Plant-Mexico Candereyta Case”, KIEE summer conference, pp. 1224-1226, 1999.

[6] Kil-Young Song, Sae-Young Kim, “Study on the Voltage Stability Considering Reactive Power Limits of Generator”, J. ENG. SCI & TECH., vol. 33, no. xx, pp. 1-6. 1996.

[7] Nam Sang-Chun, Lim Jae-Yun, “A Stability Characteristics Due to Increase of Load on Fault Condition”, Jou. of the Inst. of Const. Tech. vol, 9. no. 1, pp. 127-133, 10. 1990.

[8] Klein, M., Rogers, G. J., Kundur, P., “A fundamental study of Inter-area Oscillation in power system”, IEEE Transa. on Power Systems, vol. 6, no. 3, pp. 914 - 921, Aug. 1991.

[9] Lee, W. J., Chen, M. S., Gim, Y. H., et al., “Dynamic stability analysis of an industrial power system”, IEEE-IAS Annual Conference, pp. 1477-1482, Oct. 1993.

[10] Martin, N., and Lima, L. T. G., “Determination of suitable locations for power system stabilizer and static var compensators for damping electro mechanical oscillations in large scale power system”, IEEE Trans. Power Systems, vol. 5, no. 4, pp. 1455-1469, Nov. 1990.

[11] IEEE Committee Report, “Excitation system models for power system stability studies”, IEEE Trans. Power Apparatus and Systems, vol. PAS-100, no. 2. pp. 494-509, Feb. 1981.

[12] Bong-Hee Kim, “Time Delay Limit of Over Current Relay for Maintaining Stability in Industrial Power Systems”, KIEE summer conference, pp. 190-192, 2002.

[13] Brian Stott, “Power System Dynamic Response Calculations”, IEEE, vol. 67, no. 2, pp. 219-241, Feb. 1979.

[14] P. Kunder, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, Inc., pp. 93-99, 128-135, 169-196, 279-305, 836-860.

[15] Kil-Young Song, “Electric power system engineering”, Dongilbook, pp. 163-209, 2011.

[16] Kwang-Myoung Son, Kye-Byung Lee, “A Study on the Stability of Micro-Grid System,“ KIIEE, vol. 21, no. 7, pp. 46-53. Aug. 2007.

[17] Valerijs Knazkins, “Stability of Power Systems with Large Amounts of Distributed Generation”, Doctoral Thesis Stockholm, Sweden, pp. 65-73, 2004.

[18] IEEE Std. 399-1997, “Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis”, pp. 133-162, 165-206.

[19] IEEE Std. 141-1993, “Recommended Practice for Electric Power Distribution for Industrial Plants“, pp, 61-108, 109-171.

[20] Maurice H. Kent, Wayne R. Schmus, Francis A. Mccrackin, Luther M. Wheeler, “Dynamic Modeling of Loads in Stability Studies”, IEEE Trans. Power Apparatus and systems, vol. PAS-88, no. 5, pp. 756-763, May. 1969.

[21] Isbi Felix, “Dynamic analysis of the impact of grid connection of "La Higuera" hydropower plant to the transmission grid”, Master of Science Thesis Stockholm, Sweden, pp. 14-16, 2006.

[22] IEC 60909-0, “Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems”, pp. 17-19, 31-33.
[23] Kil-Young Song, “Transmission & distribution system engineering”, Dongilbook, pp. 333-336, 2011.
[24] Charles l. Hubet, “Electric Machines”, Prentice Hall, pp. 224-225, 2001.
[25] Jin-Seok Kim, “A Study on the Components of SFCL considering the Transient Characteristics of the Circuit Breaker in Power System” master thesis soongsil university, pp. 21-22, 2014.
[26] T. Aboul-Seoud, J. Jatskevich, “Dynamic Modeling of Induction Motor loads for Transient Voltage Stability Studies“, IEEE Electrical Power & Energy Conference, pp. 1-5, Oct. 2008.
[27] C D Vournas, P W Sauer, M A Pai, “Relationships between voltage and angle stability of power systems”, IEEE Trans. Electrical Power & Energy Systems, vol. 18, no. 18, pp. 493-500, 1996.
[28] IEC 60038, “IEC standard voltage”, pp. 11-19.

저 자 소 개

신 호 전 (Ho-Jeon Shin)

1967년 2월 5일생. 2005년 경기공업대 전자통신과 졸업. 2011년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2011년 동 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 조엔지니어링 상무. 발송배전기술사
E-mail : elecsea@naver.com

조 만 영 (Man-Young Cho)

1962년 2월 10일생. 숭실대 전기공학과 졸업. 2008년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 조엔지니어링 대표. 발송배전기술사
E-mail : cmylee@hanafos.com

정 인 성 (In-Sung Chung)

1968년 1월 20일생. 2004년 서울과학기술대학교 전기공학과 졸업. 1995~2010 삼성에버랜드. 현재 조엔지니어링 상무. 발송배전기술사
E-mail : 111house@naver.com

김 진 석 (Jin-Seok Kim)

1983년 1월 26일생. 2007년 서울과학기술대 전기공학과 졸업. 2009년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2014년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2014년~현재 숭실대 전기공학과 교수.
E-mail : redwolf832@ssu.ac.kr

김 재 철 (Jae-Chul Kim)

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