

화학 플랜트에서의 비상발전기 용량선정 방안(PG3)에 관한 연구

(Study on Emergency Generator Capacity Selection(PG3) in the Chemical Plant)

이승재* · 조만영 · 김세용 · 김은태 · 강병욱 · 박한민 · 김재철**

(Seung-Jae Lee · Man-Young Jo · Se-Yong Kim · Eun-Tae Kim ·

Byoung-Wook Kang · Han-Min Park · Jae-Chul Kim)

Abstract

PG and RG methods are widely known method for calculating the capacity of the emergency generator in construction electrical installation. PG and RG methods are mainly used as a saving a life, fire protection, fire fighting in construction. Because no long distance between the emergency generator and electric motor feeder, the relatively small motor power in construction electrical installation, the capacity of generator in PG and RG methods are little problem of voltage and reactive power of generator. However in many cases the application of the PG and RG method is difficult in the Chemical Plant because it is long distance between the generator and the motor Feeder and motor capacity is very large. Motor starting power factor is about 0.2 lagging power factor and motor starting current is about 6times during motor starting. Also Most of the starting current component is a reactive power component. therefore, it is many cases that lack of reactive power and excess of allowable voltage drop limit and After selection of emergency diesel generator, problems happen during motor starting. Therefore, to be selection of effective emergency generator, active generator power, reactive power and the required reactive power during large motor starting should be considered in chemical plant. It is also required of the verification process through simulation because hand calculation is very difficult considering study cases.

Key Words : Emergency Generator, Motor Starting, Reactive Power, Active Power, Voltage Drop

1. 서 론

최근 해외에 화학 플랜트등 대규모 산업설비가 다수 시공되고 있다. 각 플랜트의 공정상 필수부하는 비교적 용량이 큰 유도 전동기가 대다수이며, 비상발전-필수 부하계통은 일종의 독립계통으로 구성된다. 따라서 화학 플랜트에서는 비상발전기 용량도 상당히 큰 경우가 많다. 이 때 비상발전기 용량선정을 위해 일반

* Main author : Masters course of Electrical Engineering at Soong-sil University
** Corresponding author : Professor of Electrical Engineering at Soong-sil University
Tel : 02-817-7966, Fax : 02-817-0780
E-mail : jckim@ssu.ac.kr
Received : 2015. 9. 5.
Accepted : 2015. 10. 15.

건축물에서 사용되는 비상발전기 용량 계산법인 PG법, RG법을 많이 사용해왔다. 일반건축물에서는 비상발전기에서 부하까지의 거리가 길지 않다. 또한 유도전동기 용량이 비교적 소용량이고, 기동기를 사용하는 경우가 많고, 전력전자 설비를 이용한 부하 비율이 적어 PG법과 RG법의 적용에 무리가 없다. 비상발전기 용량선정과 관련된 기존의 보고서, 논문, 기술서적 등에서는 일반 건축물의 비상발전기에 대한 연구가 대부분이었다[1-2].

그러나 화학 플랜트의 경우는 유도전동기 용량이 큰 경우가 많다. 또한 비상발전기와 전동기 부하까지의 거리가 비교적 길고, 전동기 기동방법은 전전압 기동이 대부분이다. 비상발전 계통에서 유도전동기의 기동중인 상태는 극심한 지상부하인 상태임과 동시에 동기발전기의 독립운전 형태이고, 발전기에서는 전기자 반작용이 심화되는 상태인 것이다[3]. 또한 무효전력(Q) 전송은 전압(E)과 매우 밀접하고, $Q \propto E^2$ 관계가 존재한다[4]. 또한 유도전동기 기동은 큰 폭의 전압감소를 야기하고, 이 전압강하는 유도전동기 기동토크 부족의 원인이 된다[5]. 이러한 이유로 PG법, RG법으로 비상발전기 용량을 적용하는데 한계가 있음을 확인하였다. 또한 고조파 발생부하 비율이 작다는 것을 고려하면 화학 플랜트에서는 PG3법에 의해 선정된 비상발전기의 피상전력이 가장 큰 경우가 대부분이다. 그럼에도 불구하고 기동 중인 대형 유도전동기 단자전압과 필요한 무효전력이 비상발전기 정격 무효출력 허용범위를 초과하는 경우가 많다. 이는 비상발전기 안전성 및 신뢰성에 문제가 생길 수 있고, 화학플랜트 공정상 문제가 발생할 수 있다는 것을 의미한다. 이에 대한 근거로 발전기 무효전력 운전 한계영역 (Reactive capability limitation)에 대해 고려하였다[6-7].

본 논문에서는 비상발전기 용량선정을 위한 PG법의 적용 시 최대용량 전동기 기동 중 전동기 단자전압을 확인하고, 전동기 기동에 필요한 비상발전기 무효전력 출력량을 비상발전기 용량선정에 고려해 보고자 한다. 또한 실제 현장에서 계산된 비상발전기 용량과 제안된 방법에 의한 비상발전기 용량을 비교 분석하기 위하여 산업용에서 널리 이용되고 있는 ETAP(Electrical Transient Analyzer Program)을 이

용하여 비상발전기의 적정성을 확인한다.

2. PG법에 의한 비상발전기 용량선정 방법 개요

PG법은 건축전기설비설계기준에서 제시하는 방법으로 다음과 같이 3가지 요소를 고려하여 가장 큰 값을 기준으로 비상발전기 용량을 선정하는 방법이다[1].

PG1법은 전부하 운전을 고려한 비상발전기 용량선정 방법으로 식 (1)과 같다.

$$PG1 = \frac{P_L \times D_f}{N_L \times PF_L} \quad (1)$$

PG2법은 최대용량 전동기만의 기동 중 순간 허용전압강하를 고려한 비상발전기 용량선정 방법으로 식 (2)와 같다.

$$PG2 = \frac{1 - V_d}{V_d} \times X'_d \times C \times P_m \times \beta \quad (2)$$

PG3법은 기저부하운전용량과 최대용량 전동기의 기동용량을 합한 것으로 비상발전기 용량선정 방법은 식 (3)과 같다.

$$PG3 = \left(\frac{P_L - P_m}{N_L} + C \times P_m \times \beta \times PF_m \right) \times \frac{1}{PF_L} \quad (3)$$

Table 1. Definition of parameter

변수	정의
P_L	비상부하출력 총합계, kW
N_L	부하 종합효율, pu
PF_L	부하 종합역률, pu
D_f	수용율
P_m	최대 시동 kVA가 있는 전동기용량
PF_m	최대기동용량인 전동기 기동역률
C	기동방식에 따른 기동입력 감소 계수 ¹⁾
V_d	P_m 전동기를 투입시 허용전압강하(pu)
β	전동기 출력 1kW에 대한 시동 kVA
X'_d	비상발전기 과도 Reactance, pu
N_G	발전기 효율, pu
PF_G	발전기 역률, pu

1) 전전압 기동=1, Y-Δ기동=0.67, 리액터기동= %V/100, 기동보상기=(%V/100)2

3. 사례연구를 통한 기존 PG법에 의한 비상발전기 용량 선정의 문제점

3.1 사례계통의 검토

그림 1은 사례연구에 사용한 비상발전기-필수부하의 주요 계통도로서 비상발전기에서 출력되는 전체부하 용량을 나타내고 있다. 그림 1 계통을 구성한 주요 데이터는 표 2와 같다.(요구조건 : 전동기 기동 중 모든 전압은 80% 유지[5,8]) PG1법, PG2법, PG3법에 의한 방법별 계산결과는 표 3과 같다.

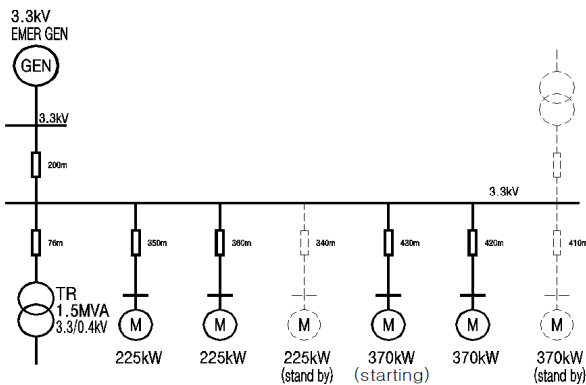


Fig. 1. Main system of emergency generation system

Table 2. Value of parameter

변수	값	변수	값
P_L	2249	C	1
N_L	0.9	V_d	0.2
PF_L	0.894	β	7
D_f	1	X'_d	0.28
P_m	370	N_G	0.98
PF_m	0.2	PF_G	0.8

Table 3. Calculated capability using PG methods

방법	PG1	PG2	PG3
계산용량	2796kVA	2487kVA	2915kVA

상기의 3가지 용량선정법 중 최대 용량인 PG3을 비상발전기 용량선정의 기준값으로 선정하고 실제 적용

용량은 발전기 제작사 표준을 고려하여 3300kVA를 선정하였다. 비상발전기 선정용량과 정상부하시 비상발전기 운전용량은 각각 표 4 및 표 5와 같다.

Table 4. Applied emergency generator capability

유효/무효전력	2640kW / 1980kVAR(0.8 지상)
피상전력	3300kVA
정격역률	0.8(지상)~0.9(진상)

Table 5. Emergency generator capability during normal load operation

유효/무효전력	2249kW / 1130kVAR
피상전력	2518kVA
운전역률	0.894 (지상)

표 4에서 선정된 비상발전기 용량은 공동주택 등 비상발전기로부터 전동기까지의 거리가 길지 않고, 전동기 용량이 비교적 작은 개소에 적용하는데 문제가 없다. 그러나 화학 플랜트의 경우는 비상발전기부터 전동기까지 거리가 비교적 길고, 전동기 용량이 비교적 큰 경우가 많다. IEEE 399-1997, Chap 9에서 기술된 전동기 기동 검토 필요성, 문제점과 현상 등을 기준하였다[8]. 표 4에서 선정된 비상발전기 용량을 기준으로 370kW 전동기 전전압 기동 중 전압강하를 검토한 결과 아래와 같이 2가지 문제점이 파악되었다.

- 1) 대용량 전동기 전전압 기동 중 전압강하가 허용 범위를 초과하는 문제점 발생
- 2) 대용량 전동기 전전압 기동 중 비상발전기 정격 무효출력 범위를 초과하는 문제점 발생

3.2 비상발전기와 전동기까지의 거리가 비교적 긴 경우 전동기 전전압 기동 중 전압강하 문제

표 4에서 선정된 비상발전기 용량을 기준으로 370kW 전동기 전전압 기동 중 각 모선에서 나타내는 전압은 ETAP으로 시뮬레이션 한 결과로서 아래의 그림 2에 나타내었고, 표 6에 결과를 정리하였다. 그 결

과 370kW 전동기 기동 중 단자전압은 77.37%이므로 요구사항을 만족하지 못함을 알 수 있다.

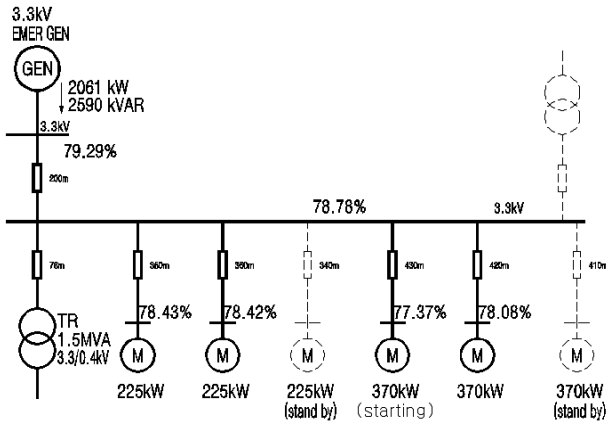


Fig. 2. Terminal voltage and generator output during motor starting before improvement

Table 6. Comparison required voltage and terminal voltage during Direct On Line motor starting

항 목	요구전압	단자전압	여부
225kW (운전 M)	80%	78.42%	X
370kW (기동 M)	80%	77.37%	X
370kW (운전 M)	80%	78.08%	X

3.3 전동기 전전압 기동 중 발전기 무효전력 공급의 문제

다음 3가지 경우에 대하여 유효전력, 무효전력, 피상전력을 각각 구분하여 표 7에 비교 검토하였다. 370kW 전동기 전전압 기동 중 비상발전기 무효전력 공급에 문제가 있음을 확인하였다.

- 1) PG3에 의해 선정된 정격 발전용량(표 4)
- 2) 정상운전 중 필요한 비상발전기 용량(표 5)
- 3) 370kW 전동기 전전압 기동 중 발전기 필요 전력 (그림 2)

참고로 ETAP 시뮬레이션 프로그램을 이용한 독립 계통의 조류계산은 발전기를 슬랙 모션으로 설정해야만 가능하다.

Table 7. Comparison of required generator capability

사례	유효출력	무효출력	피상전력	역률
1)	2640kW	1980kVAR	3300kVA	0.8
2)	2249kW	1131kVAR	2518kVA	0.8
3)	2061kW	2590kVAR	3310kVA	0.623

표 7로부터 PG3 방법으로 선정된 비상발전기 용량에서 유효전력은 적용이 가능하나, 무효전력은 부족하다는 것을 알 수 있다. 즉 370kW 전동기 기동 중 필요한 발전기 무효전력 출력은 2590kVAR이나, 선정된 발전기 무효전력 출력은 1980kVAR이 되므로, 610kVAR 정도가 부족함을 알 수 있다.

상기 본 절에 기술한 바와 같이 PG법에 의한 비상발전기 용량선정의 적용이 어려운 경우가 있다는 것을 확인할 수 있다. 발전기 연속운전 중 전압은 +/-5% 이내, 주파수는 +/-2% 이내에서 운전되어야 하고 이를 벗어난 운전범위에 엄격한 시간제한이 부과되어야 한다[9-10].

4. 사례연구를 통한 PG3법의 개선점 제안

4.1 개선된 비상발전기 용량선정

상기와 같이 대규모 비상 계통 내 비상발전기 용량선정 시에는 피상전력이 기준이 되는 PG법의 적용에 한계가 있음을 확인하였다. 그러므로 화학 플랜트와 같은 대규모 비상 계통 내 비상발전기는 유효전력과 무효전력이 모두 고려되어야 한다는 것을 제안할 수 있다.

전압 변화에 따른 부하의 용량변화는 무시하고, 4.1절 및 4.2절에서 제시된 결과를 종합적으로 고려하면 비상발전기 정격 출력은 최소한 유효전력 2249kW, 무효전력 2590kVAR 이상이 되어야 함을 알 수 있다. 따라서 비상발전기 최소용량의 피상분 전력은 3430kVA, 역률은 0.655pf이 됨을 알 수 있다.

제작사의 일반적인 표준정격에 준하여 역률 0.8을 가정하여, 무효전력 2590kVAR을 만족시키기 위한 비상

발전기 최소용량의 피상분 전력은 4317kVA이 된다.
 최종적으로 시뮬레이션을 통한 전압 변화에 따른 부하 용량변화와 제작사 표준용량을 고려하면 표 8과 같이 적용되어야 할 것으로 사료된다.

Table 8. Applied emergency generator capability after improvement

유효/무효전력	4000kW / 3000kVAR (0.8 지상)
피상전력	5000kVA
정격역률	0.8(지상)~0.9(진상)

4.2 전동기 전전압 기동 중 전압강하 개선

비상발전기 용량개선 후 전동기 전전압 기동 중 전압은 아래와 같이 나타났다.

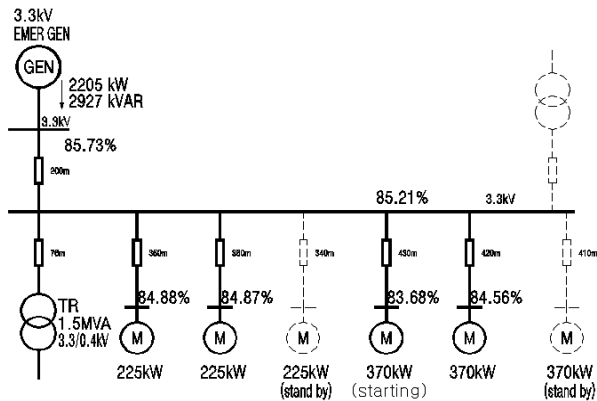


Fig. 3. Terminal voltage and generator output during motor starting after improvement

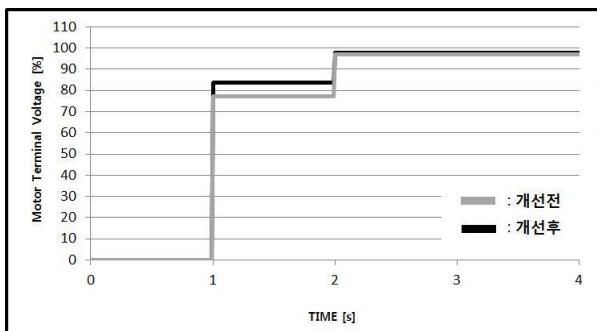


Fig. 4. Graph of Comparison of terminal voltages before and after Improvement terminal voltage during motor starting

Table 9. Comparison of terminal voltages

	용량변경 전	용량변경 후
225kW(운전 M)	78.42%	84.87%
370kW(기동 M)	77.37%	83.68%
370kW(운전 M)	78.08%	84.56%

표 8의 비상발전기 정격용량을 적용하여 전동기 전전압 기동 중 단자전압강하는 83.68%가 되어 그림 2의 결과보다 약 6.31%정도 전압이 상승하여 단자전압의 허용조건인 80% 이상을 만족한다.

4.3 전동기 전전압 기동 중 발전기 무효전력 개선

표 8의 비상발전기 정격용량을 적용하여 전동기의 전전압 기동 중 필요한 무효분은 2927kVAR(그림 3)이 되어 정격용량으로 선정된 3000kVAR을 만족한다.

4.1절과 4.2절로부터 대용량 전동기 전전압 기동 중 전압강하 뿐만 아니라 비상발전기 무효전력의 검증이 매우 중요함을 확인하였다.

5. 결론

본 논문은 실제 진행 중인 화학 플랜트 사례를 기준하였다. 독립된 계통에서 비상발전기 용량선정은 부하 종류, 크기, 수량 등에 따라 PG법의 적용이 달라질 수 있다. 특히 비상 발전기 정격 무효출력 범위와 대형전동기 기동 중 부하측 무효전력의 비교 검토가 매우 중요함을 확인하였다. 즉 독립된 계통인 비상발전기 정격 무효전력을 결정하기 위해서는 PG법 또는 RG법의 계산뿐만이 아니라 시뮬레이션을 통한 검증 과정이 필요하다고 판단된다.

본 논문은 화학 플랜트내 독립계통뿐만 아니라 전전압기동이 주로 사용되는 소규모 독립계통이 구성되는 산업 플랜트에 전반적으로 참고할 수 있는 자료가 될 것으로 생각된다. 각 산업 플랜트에서 전동기 기동에 대한 검토는 해당 모선의 최대 용량 전동기를 최종 기동하여 최악의 상태를 고려하는 것이 일반적이다. 그

러나 각 플랜트 공정을 고려하여 가능한 범위 내에서 전동기 기동 순서 등을 적절하게 하고, 신뢰성 및 경제성을 고려하여 실제적인 검증이 필요할 것으로 판단된다.

References

- [1] Ho-Jun. Lee, "A study on selection methods of emergency generator capacity for various building electrical loading system", M.S. dissertation, Hanyang University, 2015. 2.
- [2] KOREA LAND & HOUSING CORPORATION, "A Study on the Capacity Estimation Methods for the Emergency Electric Generators", 1995.12.
- [3] Sang-Don. Kim, "The Research of Industrial Plant Synchronous Generators Operation Characteristics and Performance Tests", M.S. dissertation, Korea University, 2014. 6.
- [4] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, Inc., pp. 224, pp254, 1994.
- [5] WAYNE T.HOAN, and MARK CHOW, "Transient Stability Analysis for Sohio Prudhoe Bay Eemeragency Power System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. IA-22, No.4, p.430-p.434, May/June 1986.
- [6] M.M.Adibi, and D.P.Milanicz, SM, "Reactive Capability Limitation of Synchronous Machines", IEEE Transactions on Powr systems, Vol.9, No.1, p.29-p.40, February 1994.
- [7] J. Y. JACKSON, "Interpretation and Use of Generator Reactive Capability Diagram", IEEE Transactions on Industry and General Applications, Vol. IGA-7, No.6, p.729 - p.732, November/December 1971.
- [8] "IEEE Recommended Practice for Industrial and Commercial Power System Analysis", 9.2.2, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std 399-1997.
- [9] "IEEE Guide for Abnormal Frequency Protection for Power Generating Plants", 4.2.2, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. IEEE Std C37.106-2003.
- [10] "Rotating electrical machines-Part 3 : Specific requirements for synchronous generators driven by steam turbines or combustion gas turbines, 4.6", The International Electro-technical Commission(IEC). IEC 60034-3-2007.

◇ 저자소개 ◇



이승재 (李承宰)

1975년 9월 30일생. 2002년 광운대학교 전기공학과 졸업. 2014년~현재 숭실대 전기공학과 석사과정. 조엔지니어링 계통기술팀근무. 발송배전기술사.
E-mail : mail@joeng.co.kr



조만영 (趙萬英)

1962년 2월 10일생. 숭실대 전기공학과 졸업, 2008년 숭실대 대학원 전기공학과 졸업(석사) 2013년~년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 조엔지니어링 대표이사. 발송배전기술사.
E-mail : mail@joeng.co.kr



김세용 (金世容)

1972년 1월 12일생. 1999년 홍익대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 조엔지니어링 계통기술팀근무.
E-mail : mail@joeng.co.kr



김은태 (金殷泰)

1974년 3월 3일생. 2012년 숭실대학교 전기공학과 대학원 졸업(석사). 조엔지니어링 계통기술팀근무.
E-mail : mail@joeng.co.kr



강병욱 (姜炳旭)

1985년 1월 21일생. 2010년 숭실대학교 전기공학과 졸업. 2012년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정 수료.
E-mail : kangbw@ssu.ac.kr



박한민 (朴韓民)

1988년 9월 21일생. 2014년 안양대 전자공학과 졸업. 현재 숭실대학교 대학원 전기공학과 석사과정.
E-mail : bhm1359@nate.com



김재철 (金栽哲)

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