

전력계통 안정화 방안 연구

김용진, 이강완
GS 칼텍스(주), (주)대화기술사

A Study on the Power System Stabilizing Scheme

Yong-Jin Kim, Kang Wan Lee
GS Caltex, DAEHWA Engineering & Consultants Co., Ltd.

Abstract - 대규모 전력계통인 한국전력과 154kV 송전선로로 연계되는 석유화학공장 전력계통에 작은 용량의 자가발전기가 병렬운전 되는 경우이다. 전기사고로 한국전력과 연계 송전선로가 개방되어 석유화학공장 전력계통이 단독으로 분리되면 발전이 수요에 크게 못 미치게 되어 급격한 주파수 저하 및 과도한 전압강하가 나타나고 이로 인하여 발전기가 정지되어 공장 전체가 정전에 이르게 되는 사고 가능성이 있다. 본 논문은 이와 같은 대규모 전력계통과의 연계선로 개방으로 나타나는 과부하 상태에서 주파수 안정화 및 전압강하에 대처할 수 있는 부하차단 또는 계통 분리로 수급 불균형을 해소하고, 단시간 전압강하 상태에서도 효과적으로 전력계통 안정화가 지속될 수 있는 방안 등을 전력계통 동특성 해석도구를 이용하여 모의하고 이를 실제 전력계통에 적용코자하는 사례 연구이다.

한 54Hz로 가정하여 이 주파수에 도달하는 시간을 계산하면

$$\frac{0.1}{1.21} = 0.083[\text{sec}] \text{ 이다.}$$

그러나 이와 같은 최저허용 주파수 도달 시간은 발전기 및 부하의 동특성을 충분히 반영하지 않은 상태에서 계산된 것이므로 전력계통 구성 및 설계시 참고 자료로만 활용될 수 있다. 전력계통의 안정화 방안 또는 부하차단 방안은 발전기 제어계통인 조속기 및 여자기 특성은 물론 부하의 동적인 특성들이 충분히 반영될 수 있도록 각각의 발전기 및 부하의 동특성을 상세히 모의한 안정도 해석으로 실제 계통에 적용 가능한 최적 안정화 방안을 제시한다.

2. 본 론

1. 서 론

전력계통에서 연계 송전선로가 개방되어 발전이 수요에 크게 못 미치는 불균형 상태가 발생하게 되면 계통주파수특성으로 인해 계통 주파수 변화를 억제하려고 한다. 그러나 발전과 수요 간의 불균형이 상대적으로 크거나 또는 병렬 운전 중인 발전기들의 충분한 순동예비력(Spinning reserve power)이 확보되지 않는 경우 즉, 주파수조정 기능이 충분하지 못할 때는 전력계통의 주파수가 규정치를 벗어날 수 있고, 아울러 무효전력 부족으로 인하여 전압강하가 발생하여 전력계통의 정상 운영을 저해하게 된다. 전력계통에서 발전력 부족으로 인하여 주파수가 저하되는 특성은 불균형 정도를 나타내는 과부하율, 발전기 관성정수 및 부하인감도 등이 중요 변수이다.

대상 전력계통은 한국전력과 154kV 송전선로 2회선으로 연계되어 있으며 154/22.9kV, 50/60MVA 변압기 2대 또는 3대를 통하여 22.9kV 모선에 연결된다. 예상되는 전력 수요는 66MW이고 자가발전기 용량은 10MW 이므로 한국전력과 연계선이 분리된 경우 과부하율 ΔP 는

$$\Delta P = \frac{Gen - Load}{Gen} = \frac{10 - 66}{10} = -5.6 \text{ p.u.}$$

이는 상대적으로 매우 큰 과부하율이다. 아울러 계통 분리 초기 주파수 저하율을 결정짓는 발전기 관성정수는 2.309[MW·s/MVA]로 이는 일반적인 화력발전기 관성정수 보다 작다.

계통분리 초기 주파수 저하율은 다음과 같다

$$\frac{df}{dt} = \frac{\Delta P}{2H} = \frac{-5.6}{2 \times 2.309} = 1.21[\text{p.u./sec}]$$

만일 최저허용 주파수를 스팀터빈발전기 제작사가 제시

2.1 발전과 수요 불균형 모의

전력계통은 여러 가지 요인에 의하여 전기적 사고가 불가피하게 발생한다. 대부분의 전력을 전력회사로부터 공급받고 있는 전력계통은 연계 송전선로 개방으로 발전과 수요의 불균형이 나타나고, 이로 인하여 계통 주파수 저하 및 전압강하가 발생하여 전력계통의 안정 운영을 위협하게 된다.

전력계통에서 주파수가 규정 범위를 벗어난 상태로 운전하게 되면 전력을 사용하는 수용가에 나쁜 영향을 미치게 되고 전력 공급자 측에게는 터빈발전기 수명을 단축하게 된다. 즉 비정상 주파수 운전의 경우 터빈발전기 회전체에 진동이 발생한다. 이와 같이 터빈발전기 측에 진동이 발생하면 터빈 날개에 스트레스를 가하게 되며 심한 경우는 진동이 터빈 공진 속도에 근접하여 터빈 날개를 손상시킨다.

연계 송전선로가 개방되어 발전과 수요의 불균형이 발생한 경우 유효전력 부족에 의한 주파수저하는 물론 무효전력 부족으로 인하여 전압강하가 발생하게 된다. 전압강하는 전력설비의 출력을 변화시키고 회전기기의 경우는 전압 변동에 따라 회전수가 변하는 것도 있다. 전압강하가 심한 경우는 전력설비 운영을 정지시키고 전압안정도 상실로 전력계통을 붕괴시켜 운영 불능 상태가 되게 한다. 대상 전력계통 부하설비는 대부분 유도전동기로 구성되어 있으며 유도전동기는 계통 전압의 영향이 매우 크게 나타난다. 다음 표 1은 전동기 기동시 기동전동기 및 인접 전력설비의 최소 허용 전압을 나타낸 것이다. 이 중에서 특히 제어설비는 최소 허용 전압이 비교적 높게 되어 있어 전력회사와의 연계 송전선로 개방으로 무효전력이 부족해서 전압강하가 발생하게 되면 대부분의 전동기 제어 접점이 개방되므로 이의 적정 대책 수립이 필요한 상태이다.

표1 전동기 기동시 허용전압

전압강하 위치	최소허용 전압(%정격)
기동전동기 단자	80
다른 전동기 단자	71
교류 접점 제어설비	85
직류 접점 제어설비	80
정지형(Solid-State) 제어설비	90
조명 플러커 인지	3% 변화

검토 대상 전력계통의 부하설비는 대부분 유도전동기들이다. 즉, 전력계통 동특성을 모의하기 위한 부하 모델이 정태부하 모델 보다는 동태부하 모델인 유도전동기 모델 비중이 더 크다.

유도전동기는 1차와 2차권선이 회전자속을 중간에 놓고 서로 유도작용에 의하여 전압, 전류를 발생하므로 등가 변압기로 놓을 수 있고 이것에 의하여 등가화 모델을 만들 수 있다.

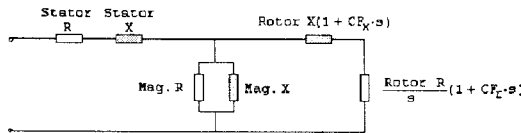


그림 1 유도전동기 등가모델

그림 1은 유도전동기 등가 모델이고 그림 2는 이를 등가회로로 바꾼 것이다.

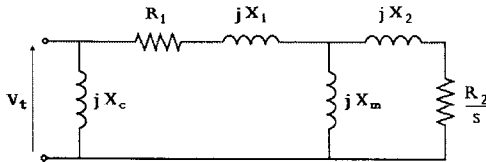


그림 2 유도전동기 등가회로

2.2 전력계통 안정화 방안

전력계통 안정화 방안은 첫째 연계 송전선로 개방 상태를 감지하여 자가발전기가 감당할 수 있는 부하에만 전력을 공급할 수 있도록 계통을 분리하는 방법과 둘째 저주파수계전기를 이용하여 발전력 부족 상태를 인지하여 계통을 분리하는 방법 2가지를 수용할 수 있게 한다. 특히 두 번째의 경우 한국전력 154kV 변전소 전원으로 연결되는 송전선로 개방시 꼭 필요한 방안이며 첫 번째의 안정화 방안이 실패할 경우 이를 보완할 수 있는 후비보호 기능을 수행할 수 있는 장점이 있다. UFR 정정은 한국전력 1단계 부하차단 주파수 58.8Hz를 고려하여 Frequency 58.7Hz, Time delay 0.05초로 한다. 그림 4는 이와 같은 전력계통 안정화 방안을 구성한 Logic 이다.

그러나 연계 송전선로 단락 또는 지락사고로 연계 송전선로가 개방되어 대상 전력계통이 단독으로 분리된 경우 무효전력 부족으로 전압강하가 발생하여 저전압 상태가 될 것이며 저전압으로 인하여 필수 부하의 대부분을 차지하는 유도전동기 제어접점 개방으로 공정이 정지되어 정상운전이 불가능해 질 것이다. 따라서 단시간 저전압 상태에서도 제어접점이 개방되지 않도록 비정상전압 대책을 수립해야한다. 그 방안으로 고압 및 저압을 다음과 같이 조치한다.

- 6.6kV 전동기 : 제어전원을 DC 110V 무정전전원
- 440V 전동기 : 전자식차단자연계전기(SDDR) 사용

즉, 순간 전압강하로 공정운전이 중단되어 부하를 재기동 시키는 일 없이 지속적으로 정상 운전되도록 한다.

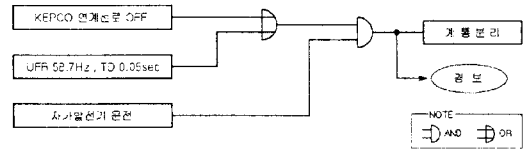


그림 3 전력계통 안정화 방안

2.3 전력계통 상정사고 모의

전력계통 안정도에 영향을 미치는 전기적 사고는 다음과 같은 것들이 있다.

- 중요선로 및 모선 단락사고
- 연계선로 분리(계통분리)
- 전원 탈락
- 부하 탈락

이중에서 전력계통 안정운전에 심각한 영향을 미치는 것은 중요선로 및 모선 단락사고와 연계선로 분리로 압축된다. 특히 단락이나 또는 지락사고 없이 연계 송전선로가 개방되거나 또는 한국전력 154kV 변전소 사고로 전원 측으로 가는 송전선로가 개방되는 경우 계통 주파수 저하속도가 매우 빨라서 초고속의 계통분리 또는 부하차단이 요구된다.

상정사고의 경우는 보호계전기 즉, 과전류계전기, 임피던스계전기 또는 차동계전기 등의 동작으로 사고가 제거되거나 또는 사고구간 제거와 동시이거나 시차를 두고 전력계통 안정화설비(또는 부하차단설비)로 계통을 분리하게 된다.

일반적으로 전력계통에 고장이 발생하게 되면 보호계전기가 이를 검출하여 전진한 전력계통으로부터 분리되도록 차단기를 개방하게 되는데 이때 차단기가 개방될 때까지의 시간 즉, 고장제거시간(Fault Clear Time)은 첫째 주보호설비(Primary Protection Device)의 보호계전기 순시요소에 의한 고장제거, 둘째 후비보호설비(Backup Protection Device)에 의해 고장이 제거되는 경우 2가지를 가정할 수 있으나 본 연구에서는 주보호설비의 순시 요소에 의하여 고장이 제거되는 것으로 가정하여 고장제거 시간을 다음과 같이 모의한다.

- 보호계전기 순시요소 동작 시간 : 2 Cycle
- 차단기 차단시간 : 3 Cycle
- 여유 시간 : 1 Cycle
- 총 소요시간 : 6 Cycle

즉, 고장이 발생하여 고장이 제거될 때까지의 지속 시간을 0.1초(6 Cycle)로 가정한다.

그림 4는 연계 송전선로에 단락 사고가 발생하여 고장 지속 시간 0.1초 후에 연계 송전선로가 개방되어 필수 부하에만 자가발전기가 전력을 공급하는 경우의 주파수를 나타낸 것이다. 연계 송전선로 개방으로 주파수가 저하하여 저주파수계전기 정정치 58.7Hz에 도달하고 0.15초(저주파수계전기 시간지연 0.05초, 차단기 개방시간 0.1초) 후에 자가발전기가 필수부하에만 전력을 공급할 수 있도록 안정화 방안에 따라 계통을 분리한 다음 주파수가 회복되고 있다.

그림 5는 단락고장 지속시간 동안 및 연계 송전선로 개방으로 전압이 급격히 저하되는 것을 나타내고 있다. 이와 같은 단시간 저전압 발생에서도 안정화 방안으로 제시된 비정상전압 대책으로 계통 분리 후 전압이 정상상태로 복귀하면 필수부하의 대부분을 차지하는 전동기 정상운전이 계속될 것이다.

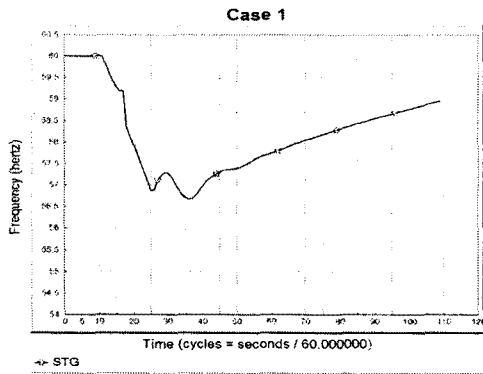


그림 4 연계 송전선로 단락고장 모의 주파수

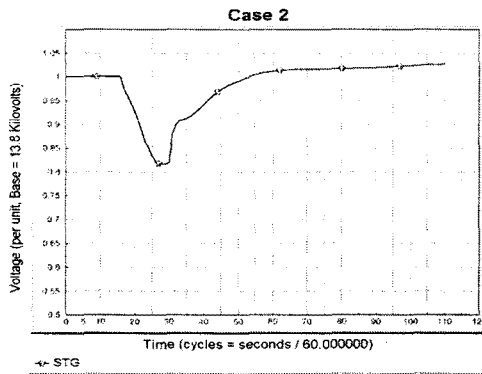


그림 7 한국전력 154kV 변전소 전원 상실 모의 전압

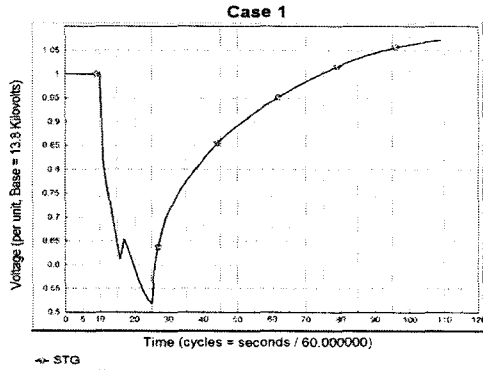


그림 5 연계 송전선로 단락고장 모의 주파수

그림 6은 대상 전력계통에 전력을 공급하는 한국전력 154kV 변전소 전원이 끊긴 상태를 모의한 것이다. 이 경우 한국전력에서 다른 수용가에게 공급하는 전력을 32.4MW로 가정하면 수용가 합계 수요가 98MW로 되어 사고발생 초기 자가발전기가 용량의 거의 10배에 달하는 부하설비에 전력을 공급하는 형태가 되어 매우 빠른 속도로 주파수가 저하하게 된다. 저주파수계진기에 의한 안정화 방안으로 계통분리가 된 다음에 주파수가 정상 상태로 복귀하고 있다. 계통 주파수는 54.5Hz 이하까지도 저하되지만 자가발전기 제작사가 제시한 한계 저주파수 54Hz, 2초 이상이 되어 안정화된 전력계통 운영이 예상된다. 그림 7은 이때의 전압 상태를 나타낸 것이다.

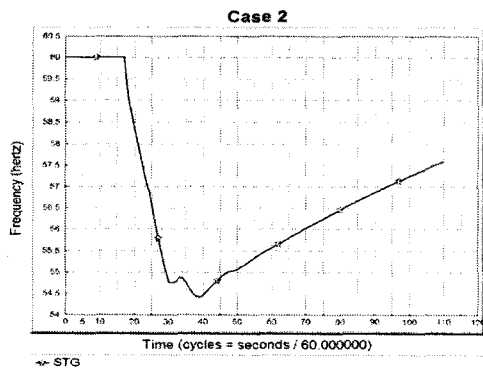


그림 6 한국전력 154kV 변전소 전원 상실 모의 주파수

3. 결 론

자가발전기 용량이 수요에 크게 못 미치는 전력계통에서 전력회사와의 연계 송전선로가 개방되면 과부하율이 매우 커서 계통 안정화 방안 수립이 용이하지 않고, 특히 무효전력 부족으로 인하여 발생하는 비정상 저전압으로 유도전동기 부하가 많은 경우는 이들 전동기의 운전 정지로 정상 운전이 어렵게 된다.

전력계통에서 발생할 수 있는 다양한 전기적 사고를 감안할 수 있도록 연계 송전선로 개방으로 발생하는 주파수 회복 방안은 물론 저전압 상태에서도 안정된 전력 공급이 지속될 수 있는 방안을 제시하고 이를 전력계통 동특성 해석 도구를 이용하여 다각도로 모의하였다.

앞으로 실제 계통에 적용된 안정화 방안 운전 자료를 수집 지속적인 연구로 전력공급의 신뢰성을 제고 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] 유영식, 오석봉, 이강완, "PLC를 이용한 고속동작 부하차단 및 계통분리 시스템", 한전기학회, 2005년도 하계학술대회는 문집, pp27-29, 2005, 7 2003. 11
- [2] 오동환, 한무호, 이강완, "안정도 해석프로그램을 이용한 유도전동기 기동해석", 대한전기학회전력기술분회, 2002년도 추계학술대회는문집, pp91-93, 2002, 11
- [3] P.Kunder, "Power System Stability and Control", McGraw - Hill, 1993
- [4] P.M. Anderson, "Power System Protection", McGraw - Hill, 1999
- [5] Berdy, J., "Load Shedding Application Guide", General Electric Trans, 1968
- [6] "PSAF for Windows User's Guide and Reference Manual", CYME International T&D Inc., May 2006
- [7] "CYMSTAB for Windows User's Guide and Reference Manual", CYME International T&D Inc., August 2004