

과도 안정도를 고려한 주파수 계전 알고리즘 개발

이병현, 김철환  
성균관대학교

The development of frequency relaying algorithm considering a transient stability

B.H. Lee, C.H. Kim  
Sungkyunkwan Univ.

**Abstract** - A frequency relaying algorithm which is used system separation and load shedding to improve transient stability is proposed. The algorithm can trip the generator and shed load in the abnormal frequency condition. The computer simulations of load flow analysis is used to determine the amount of load to be shed in an underfrequency condition. Furthermore dynamic brake energization in the simulation is performed for the control of overfrequency.

1. 서 론

본 논문에서는 계통 보호를 위한 계전 기법 중 주파수를 사용하는 주파수 계전을 사용하여 과도안정도 향상이 이루어지는 것을 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 계통에 동기탈조를 발생시킬 수 있는 시나리오를 상정하여, 과도안정도 향상을 위하여 과주파수 계전을 사용하여 이상 상태의 발전을 계통에서 분리하였다. 또한, 외란의 전파로 발생할 수 있는 단독 운전 현상에 의한 island 계통의 발전량-부하량 불균형 상태에 따른 주파수의 변화를 감지함으로써 적절한 부하 차단을 실시하였다. 그리고 과도한 부하 차단 동작에 의한 과주파수 상태를 상정함으로써, Dynamic Brake Energization[1] 기법을 사용하여, 계통의 과주파수 상태를 억제하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서, 외란이 발생하여 불안정해진 계통의 과도안정도를 향상시켰음을 보였다.

2. 본 론

2.1 과도안정도와 주파수 계전

과도안정도란 급격한 외란에 대하여 동기가 동기를 유지하며 전력 전송을 할 수 있는 능력을 의미한다. 전력 계통에서는 심각한 고장, 급격한 부하의 변동, 스위칭 현상 등에 의하여 전력 동요 현상이 발생할 수 있으며, 계통상의 전력 동요 상태가 더욱 심해지는 경우, 계통에 극심한 불안정 상태가 발생한다. 이로 인하여 발전기가 서로 동기를 상실하여 선로 양단의 계통 전원이 동요하는 동기탈조 현상이 발생할 수 있다. 동기탈조 상태의 동기는 연결된 계통 전체의 불안정을 초래할 수 있다. 지금까지 연구된 과도안정도의 향상 기법 중 하나는, 계통의 분리 및 부하 차단[2]이다. 따라서 불안정한 발전기의 분리 및 부하 차단을 적절하게 실시함으로써, 계통 전체가 불안정 상태가 되는 것을 막을 수 있다. 본 논문에서는 계통 보호를 위한 계전 기법 중 주파수를 사용하는 주파수 계전을 사용하였다.

2.2 동기탈조 시의 주파수 변화

계통 네트워크 상에서 심각한 계통 외란은 때때로 중부하 선로를 트립시키게 할 수 있다. 이것은 종종 상호 연결된 계통 간의 분리를 일으켜 단독 운전 현상을 발생시킬 수 있다. 만약에 계통이 두 개의 단독 운전 계통으로 나뉘어 진다고 가정하면, 하나의 단독 운전 계통이 과주파수 상태가 되면, 남은 하나는 저주파수 상태가 된다[3].

과주파수 상태는 일반적으로 회전자의 속도를 증가시킨다. 과속 상태를 계속 지속하는 것은 정상 상태 보다 발전 부하량이 낮다는 것을 의미하며, 또한 빠른 속도로 인해서 냉각 효과가 향상되므로 일반적으로는 심각한 문제가 아니다[3]. 그러나 과도한 발전량으로 인한 과주파수 상태 외에도, 심각한 전력 동요 상태로 인한 동기탈조 발생시에도 발전기의 주파수는 계속적으로 상승하게 된다. 동기탈조를 일으킨 과주파수 상태의 발전을 계속 계통에 연계된 상태로 운전할 경우, 다른 동기 발전기의 추가적인 탈락이 발생할 것이다. 그러므로 발전기 주파수의 상승을 감지하여 과주파수 상태를 일으키는 발전을 계통에서 신속하게 분리할 필요가 있다.

저주파수 상태에서 발전기는 과부하상태가 되고, 회전자의 속도 및 냉각 효과가 정상 상태보다 떨어진다. 따라서 발전기 과열 및 저주파수로 인한 발전기 트립이 일어난다. 계통 발전기의 쇼트나 트립은 다른 발전기에 영향을 미칠 수 있으며, 외란이 계속 전파될 경우 결과적으로 단독 운전 계통의 완전 정전 상태를 야기할 수 있다. 또한, 어떠한 사고로 인하여 발전기의 탈락이 이루어진 후 인접 계통의 분리로 인한 단독운전 상태가 발생할 경우, 발전량 부족으로 인

한 저주파수 상태가 발생할 가능성이 존재한다. 따라서 저주파수 계전을 통하여 적절한 부하를 차단함으로써 발전량과 부하량의 균형을 회복시킬 수 있다.

2.3 과도안정도를 고려한 주파수 계전 알고리즘

과도안정도를 향상시키기 위한 계통 분리 및 부하 차단을 위한 적절한 계전 정지를 구하기 위해서는, 부하 조류 해석의 컴퓨터 시뮬레이션, 단락 회로 해석 및 다양한 부하 상태에서의 안정도 해석이 실행되어야 한다. 그리고 적절한 수학적 모델들과 계통 네트워크 상의 정확한 파라미터들, 발전기, 여자기, 조속기 제어 계통과 부하들이 명확화 되어야 한다[4]. 이 논문에서는, 저주파수 상태에서의 트립 주파수를 우리나라의 부하 차단 단계 중 첫 번째 단계인 58.8Hz로 정하고, 빠른 주파수 회복을 위하여 부하 차단량[5]을 계산하여 차단하도록 설정하였다. 또한 과주파수 트립 주파수를 61Hz로 설정하였다[6]. 그리고 시뮬레이션을 통해 부하 조류를 해석함으로써[4], 예상되는 총 차단 부하량을 사고 이전에 미리 계산하였다. 또한 최대한 빠른 속도로 계통 주파수를 회복시키기 위하여, 부하 차단 단계를 나누지 않고, 58.8Hz 상태에서 저주파수 계전에 의하여 전체 차단 부하량을 차단함으로써, 가장 빠르게 계통을 비정상적 주파수 상태에서 안정시키는 방법을 선택하였다.

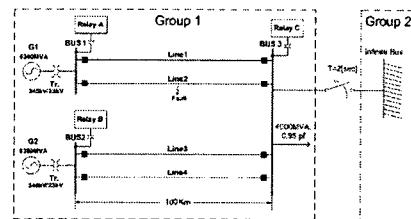
비정상 주파수 상태에서의 주파수 조정을 위한 강제 제어 동작들과, 또 다른 여러 가지 원인들로 인하여 과도한 차단이 이루어질 수 있다[2]. 과도한 부하 차단 현상은 계통 주파수를 저주파수에서 과주파수로 변화시키는 결과를 일으키게 된다. 과주파수에서의 문제점은 증기 터빈을 이용한 발전기가 약 61Hz위의 주파수에서 과속 제어에 의하여 원하지 않은 트립을 할 수 있다는 것이다. 단독 운전 현상과 부하 차단 현상 이후 과주파수 위에서 발전소의 탈락이 발생할 경우, 차단 가능한 부하의 여분이 거의 없는 상태에서의 심각한 주파수 감소 상태를 야기할 수 있다.

Dynamic Brake Energization 기법[2]은 과주파수 상태에서 효과적인 조속기 제어를 위해 제한 주파수 이하의 대역에서 좀 더 조속기의 동작 허용하는 방법이다. 이 기법을 처음으로 적용한 경우[2]에서 동적 부하의 제어는 60.5Hz의 주파수에서 활성화되고, 약 60.1Hz에서 제거되었다. 본 논문에서 Dynamic Brake Energization Load(DBEL)의 크기는 이 기법을 사용할 경우, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 부하량을 변화시키면서, 가장 효과적인 부하의 크기를 선정하는 것을 추천한다.

3. 시뮬레이션 결과

3.1 시뮬레이션 방법

시뮬레이션 한 송전 계통은 그림 1과 같다.



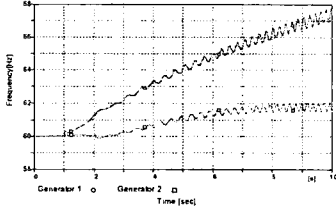
〈그림 1〉 시뮬레이션 계통

345kV 계통이고 동기발전기는 EMTP Type-59 동기기 모델과 TACS를 이용한 조속기, 여자기 모델을 사용하여 23kV 전압과 6300MVA 용량의 울진 N/P를 모델링 하였다. 1초에 그림 2의 Line 2의 50km 지점에 3상 단락 고장을 발생시킨 후, 1초 후 고장이 발생한 선로 양단을 개방시킴으로써 고장을 제거하였다. 또한, 2초에 Group 1과 2 사이의 스위치를 개방하여 Group 2 계통을 분리함으로써 Group 1 계통의 단독 운전 현상을 모의하였다.

### 3.2 시뮬레이션 결과

#### 3.2.1 계통 분리 이전(과주파수 계전 방식을 채용하지 않은 경우)

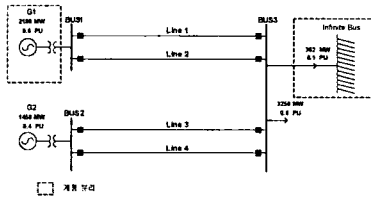
다음 그림 2는 발전기 1, 2의 주파수를 보여주고 있다. 발전기 1이 1초에 고장이 발생한 이후부터 주파수가 급격하게 상승하는 불안정한 상태를 보이고 있음을 알 수 있다. 또한, 이후에 발전기 2의 주파수 역시 급격하게 증가하는 것을 볼 수 있다. 따라서, 과주파수 계전에 의하여 61Hz가 되는 것을 감지하였을 때, 발전기 1을 계통에서 분리할 필요가 있다.



〈그림 2〉 발전기 1, 2의 주파수

#### 3.2.2 계통 분리 이후

DFT 필터링을 통한 전압, 전류 신호의 기본파 추출을 이용하여 계산된 초기상태의 유효전력은 그림 3과 같다.



〈그림 3〉 초기상태의 조류 모델

따라서 단독 운전 상태에서의 계통에서 발전기 1과 무한 모선이 계통에서 분리되었을 때, 차단해야 할 예상 부하량을 미리 계산할 수 있다[5].

$$L = \frac{(3250 - 1458)}{1458} \cong 1.229[\text{p.u}] \text{ 이므로, } d = 5 \text{ 일 때[5], 예}$$

상 최대 차단 가능한 부하량은

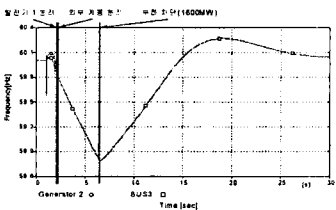
$$LD = \frac{L / (1 + L) - d(1 - f/60)}{1 - d(1 - f/60)}$$

$$= \frac{1.229 / (1 + 1.229) - 5 \cdot (1 - 58.8/60)}{1 - 5 \cdot (1 - 58.8/60)} \cong 0.501$$

[p.u], 따라서 실제 차단 부하량은  $3250 \times 0.501 = 1629.94 \cong 1600\text{MW}$  가 된다.

#### 3.2.2.1 적절한 부하차단(1600MW)을 적용한 경우

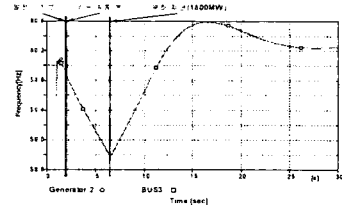
다음 그림 4는 사고 이전에 미리 계산한 부하량 1600MW를 모선 3에 연결된 저주파수 계전기 C에 의하여 6.41초에 차단 시켰을 때의 주파수를 보여주고 있다. 부하 차단에 의해서 약 14.6초 이후부터 60Hz이상의 정상 주파수로 회복되는 것을 볼 수 있다. 따라서 정해진 주파수 단계(58.8Hz 미만)에서 조류 모델에 의해서 미리 계산된 예상 부하량을 저주파수 계전에 의해서 차단함으로써, 저주파수 상태에서 주파수가 지속적으로 감소하는 계통을 정상상태로 빠르게 회복시킬 수 있음을 보여주고 있다.



〈그림 4〉 발전기 2와 모선 3의 주파수

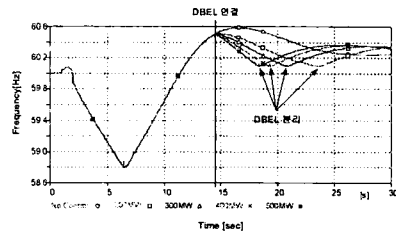
#### 3.2.2.2 과도한 부하차단(1800MW)이 이뤄진 경우

그림 5는 예상 부하 차단 량보다 200MW 큰 과도한 차단이 이루어졌을 때의 발전기 2와 모선3의 주파수이다. 부하 차단 이후 주파수가 60.5Hz 이상으로 상승하여, 안전 운전 가능 주파수 대역[6]을 벗어난 60.5Hz 이상의 상태를 약 15초 간 유지하게 된다.



〈그림 5〉 발전기 2와 모선 3의 주파수(Dynamic Brake Energization 기법 미적용 시)

이 시뮬레이션에서는, DBEL의 양을 200, 300, 400, 500MW로 바꾸어가며 시뮬레이션 하였다. 과주파수 제어가 이루어지지 않은 경우(B의 경우)와 Dynamic Brake Energization 기법을 적용한 경우에서의 발전기 2의 주파수를 비교하면 다음 그림 6과 같다. DBEL의 연결은 약 14.4초에 이루어졌으며, 분리는 각각 약 23.7(200MW), 20.7(300MW), 19.2(400MW), 18.3(500MW)초에 이루어졌다.



〈그림 6〉 Dynamic Brake Energization 기법 적용 시와 미적용 시의 발전기 2의 주파수

그림 6에서 보이는 것과 같이, Dynamic Brake Energization 기법을 적용함으로써 발전기 2의 주파수가 60.5Hz 이상으로 증가하는 시간을 단축시킴으로써 과주파수 상태를 억제하는 것을 볼 수 있다. 발전기 2의 주파수가 60.5Hz 이상의 상태를 유지하는 시간은 미적용 시에는 약 15초였던 반면에, 적용 시에는 부하량이 200, 300, 400, 500MW일 때 각각 약 1.2, 0.5, 0.3, 0.2초였다. 사용된 부하량이 많을수록 60.5Hz이하의 주파수로 떨어지는 시간이 빠르기 때문에, 270MW이하의 부하를 사용한 경우(200MW)보다 270MW이상의 부하를 사용한 경우(300, 400, 500MW)의 과주파수 억제 효과가 뛰어난 것을 알 수 있다. 또한, DBEL의 크기가 500MW(약 0.15 p.u)인 경우가 가장 60.5Hz 이상의 과주파수 상태를 빠르게 억제하는 것을 더욱 명확히 알 수 있다.

## 4. 결 론

이 논문에서는, 계통에 심각한 사고가 발생하였을 때, 발전기의 과주파수 상태를 감지하여 계통에서 분리시킴으로써, 이웃한 발전기로 외란이 전파되는 것을 막을 수 있음을 보였다. 또한 고장 이전에 조류 해석을 통한 예상 부하 차단량을 미리 계산하여, 저주파수 계전을 사용한 적절한 량의 부하량을 차단하여 발전량과 부하량의 평형을 맞춤으로써, 계통을 안정시킬 수 있음을 보였다. 불안정한 계통 상태에 따라서, 여러 가지 원인으로 인하여 저주파수 상태에서 과도한 부하 차단에 의한 과주파수 상태 제어를 위하여 Dynamic Brake Energization 기법을 사용하였다. 시뮬레이션을 통하여, 조속기가 60.5Hz이하의 주파수에서 동작할 수 있는 시간을 더욱 연장함으로써, 효과적인 과주파수 제어가 이루어질 수 있음을 보였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] C.W. Taylor, F.R. Nassief, R.L. Cresap, "Northwest power pool transient stability and load shedding controls for generation-load imbalances", IEEE Transactions on power apparatus and systems, Vol. PAS-100, No.7, 1981
- [2] P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, p1120-1121, 1994
- [3] P. M. Anderson, Power System Protection, Power Math Associates, p807-808
- [4] Chao-Shun Chen, Yu-Lung Ke, Cheng-Ting Hsu, "Protective Relay Setting of the Tie Line Tripping and Load Shedding for the Industrial Power System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 36, No. 5, 2000
- [5] James R. Jones and William D. Kirkland, "Computer Algorithm for Selection of Frequency Relays for Load Shedding", IEEE, 1988
- [6] IEEE Tutorial on the Protection of Synchronous Generator, IEEE, p27~29, 1995