

주파수 변화율을 이용한 동적부하차단 계획 방안

이소영, 장병태, 김경호, 추진부, 유영식, 조병섭, 강계희  
한전 전력연구원, 한국전력거래소

A scheme on the Dynamic Load Shedding Using Rate of Frequency Decline

S Y Lee, B T Jang, K H Kim, J B Chu, Y S Yu, B S Jo, G H Kang  
KEPRI, KPX

2. 본 론

**Abstract** - When a bulk power system experiences a serious disturbance or heavy load trip, the system frequency may drop and even collapse if the total generating power does not supply the system demand sufficiently. Since an isolated power system possesses a lower inertia and comes with limited reserves, the load shedding by under frequency relay becomes an important strategy to keep system frequency. This paper presents a scheme to determine the load shedding criteria by using the rate of change of frequency when the large disturbance happens.

1. 서 론

전력계통에서의 왜란은 대용량 발전기의 손실 또는 계통 주요개소의 고장과 같은 대규모의 갑작스런 변화된 형태를 취할 수 있다. 긴급 상황의 경우에는 제어와 보호 명령들이 계통을 가능한 한 정상적이고 안전한 상태로 회복시키기 위하여 필요하다. 컴퓨터 및 측정 기술들의 활용 증가로 인하여 보다 지능적인 설비를 전체적인 안정도를 향상시키기 위하여 지역 상황에 사용될 수 있다. 주파수 변화 비율 기능의 실행이 평가되었으며 계통분리, 주파수 저하, 전압불안정 등에 의한 계통의 붕괴를 예방하기 위하여 동적부하차단 방안을 제시한다.

전력계통 계획상의 경향을 살펴보면 경제적인 요인과 환경적인 요인에 의한 새로운 제약조건으로 인하여 운영 마진 및 여유가 거의 없는 것이 현실적이다. 동시에 민수용 발전기, 독립 전력 생산자, 거래 증가, 경쟁 환경 및 새로운 장치들은 전력계통을 운용하고 제어하기에 더욱 복잡하게 만들었으며 따라서 왜란에 더욱 취약하다. 광역 왜란 보호의 개념에 대한 검출과 제어전략이 좋을 수록 왜란의 조정이 훨씬 쉽게 이루어지며 이것은 전력 전송 및 운전의 경제성을 보다 높게 하는 중요한 기회를 나타내고 있다. 광역 왜란 보호는 시스템의 광역 정보를 사용하고 전력계통의 주요한 왜란의 파급을 막기 위하여 원격지에 위치한 곳에 해당지역의 정보를 보내는 개념이다.[1]

현재 운영되는 EMS는 SCADA와 다양한 전력계통 분석 도구에 의해 운영되고 있지만 현재의 집중제어명령들은 일부 왜란의 경우에는 너무 느리다. 빈번히 계통 운전자는 매우 복잡한 상황에 직면해야 하고 자발적인 해와 정책에 의존하여야 하는 실정이다. 따라서 지역별 자동 명령들은 빠르게 확산되는 긴급한 상황으로부터 시스템을 보호하는데 여전히 의존적이다. 전형적이고 신속한 보호 전략은 저주파수 부하차단이지만 주파수는 부하차단이 시작되기 전부터 이미 저하되고 있는 상태이다. 그러나 주파수 변화비율은 MW의 불평형 순간 표시기이며 보다 선행적이고 신속한 운영을 제공하기 위한 주파수 기능을 갖추고 있다. MW 불평형을 검출하기 위한  $df/dt$ 에 의존하기 위해서는 시스템에 대한 추가적인 정보 즉 전압, 순동 예비력, 전체 관성, 부하 기타 여러 정보가 필요하다.[4] 이런 정보는 계전기에 전달되어진다. 다만 시스템 분리가 예상되어지는 곳에서 이용할 수 있다.

본 논문에서는 계통 분리, 주파수 저하, 전압 불안정을 방지하기 위한 부하차단 방안에 대하여 논의한다.

2.1 계통분리현상

과부하에 기인한 하나 또는 그 이상의 전력계통 구성 요소들의 사고는 다른 구성요소들의 과부하를 만들 수 있다. 과부하가 주어진 시간 내에 해소되지 않는다면, 분리를 야기하는 전력계통의 연쇄 과정이 시작될 수 있다. 전력계통이 분리되면 발전력과 부하 사이의 불평형을 이루는 분리된 독립계통이 정상값으로부터 주파수 이탈의 결과가 형성된다. 저주파수로 인한 발전기 터빈중저압터빈 Blade의 치명적 손상을 가져올 수 있으며, 이로 인한 사고의 파장은 크게 된다. 발전기에 의해 불평형이 조치되지 않는다면 부하나 발전의 차단이 반드시 필요하게 된다.

기기들의 손실을 무시할 수 있고 시스템의 주파수가 일정하다면 독립계통의 주파수 응답은 식(1)에 따른다.

$$f \frac{df}{dt} = \frac{f_n^2}{2H_T} \times (P_m - P_e) \tag{1}$$

여기서,  $P_m$ 은 전체 기계적 입력이며  $P_e$ 는 독립계통에 설치된 발전기 판련된 전체 전기적 출력이며  $H_{system}$ 는 복합 관성 시정수이며 정상값으로  $f_n$ 을 갖는 독립계통의 주파수  $f$ 이다. 발전기가 과부하가 됨으로서 부하력  $P_e$ 에 동요를 일으키고 시스템 전압에 상당한 변화를 수반한다. 게다가 발전기의 속도조절 시스템은  $P_m$ 을 변화시키면서 이용할 수 있다. 순동예비력을 이용한다. 발전기 여자 시스템은  $P_e$ 에 영향을 미치면서 전압 변화에 응답한다. 따라서  $P_m$ 과  $P_e$ 는  $f$ 와  $df/dt$ 변화율을 변화시키면서 시간에 맞게 변화한다. 발전력과 부하의 균형을 재구성하기 위한 신속하고 간단한 방법은 부하를 차단하는 것이다. 계전기 기능들은 주파수, 주파수 변화율, 시간 지연들의 조합을 포함할 수도 있다. 저주파수 부하차단의 주 목적은 주파수를 정상으로 신속한 회복을 위하여 계획된 부하의 양을 차단하는 것이다. 하지만 전형적인 부하차단 방식은 사전에 결정된 시스템 시나리오에 기초를 두고 있으며 시스템 상황을 극복할 수 있도록 개조시킬 수가 없다. 따라서 특별한 시스템의 특성과 전력회사 방침에 기반을 둔 부하차단 방식을 설계함에 있어서 다수의 여러 예가 있다[5,6]. 일반적으로 현재 저주파수 부하차단 방식은 몇 가지 단점을 가지고 있다.

- (a) 차단하도록 지정된 부하는 가장한 부하배분에 좌우된다. 지정된 부하들은 탈락될 것이나 적절한 양은 보장할 수 없으므로 과차단이나 부족차단이 발생한다.
- (b) 무효전력 배분과 전압 특성이 고려되지 않았다. 송전선로의 무부하와 동시에 부하차단은 과전압을 일으킬 수 있다[5,7]. 높은 분포 커패시턴스를 가지는 케이블 계통망에서 비례어 부하 차단방식은 전압상승을 일으킬 수 있는데 이는 부하차단이 비효율적일 수 있다[8].

- (c) 부하는 불연속적인 단계별로 차단된다. 실제적인 전력 부족분을 예측할 수 없기 때문에 부하의 정확한 양이 차단되지 않을 수도 있다.
- (d) 주파수가 이미 저하되고 이용할 수 있는 순동 예비력이 고려되지 않았을 때 계전기가 동작한다. 주파수 기울기가 완만하지만 순동예비력이 주파수 회복에 충분하지 않다면 매우 느리게 정정된 계전기는 동작하지 않을 수도 있다(부족차단). 반면에 주파수가 신속히 저하된다면 순동예비력의 낮은 투입은 주파수 계전기의 조기 동작을 일으킬 수 있다(과차단).

저주파수가 전력 부족의 최종 결과라고 한다면  $df/dt$ 는 전력 부족의 순간 표시치이며 전력불균형의 상태를 초기에 인지가 가능하다. 하지만 기계 속도의 변화는 본질적으로 동요한다. 이러한 동요들은 발전기 응답에 좌우되며 위치가 다른 곳에서 다르게 나타난다.  $df/dt$ 계전기에 작용하는 기계 동요의 영향은 다음에 예를 들어 분석한다.

### 2.2 주파수 변화율

전력불균형을 야기시키는 왜란을 New England 39 Bus System에 대해서 Power Technologies Inc.의 Power System Simulator for Engineering로서 Simulation을 하였다. 39 bus system에서 선로를 제거하는 왜란으로서 계통을 2개의 분리된 계통으로 분리를 모의 하였다. 관심 계통 분리개소는 4997.0[MW] 발전력과 5497.8[MW] 부하로서 약 10[%]의 전력 부족 때문에 모선의 주파수가 저하하게 된다.

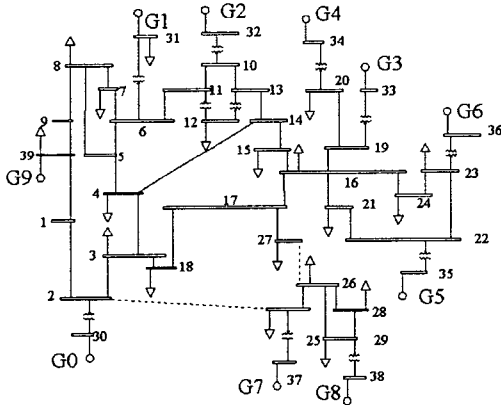


그림 1 39 Bus system

이런 주파수 하강은 관성 중심이라는 가상적인 모선의 주파수로 나타난다. 관성 중심은 축에 의한 모델링 개념으로 전력계통 과도 안정도가 발전기들의 개별 운동보다는 발전기 간의 상호 운동에 의해서 결정된다는데 기초한다. 관성 중심의 중요성은 계통으로부터 분리되려는 발전기들의 운동을 잘 나타내고 있으며 이런 발전기들의 운동과는 직접으로 관련이 없고 다만 관성 중심축을 가속시키고, 변환시키려는 에너지를 제거하는데 있다. 이 관성 상수는 보통 2~8[sec]의 범위에 있다. 계통 분리를 모의하기 위해서 2Bus-25Bus, 26Bus-27Bus를 Trip branch 시킴으로서 주파수 하강의 상황을 모의하는 계통으로의 분리를 모의 하였다.  $f_c$ 는 관성 중심 주파수이며  $f_i$ 와  $H_i$ 는 발전기에 대한 각각의 주파수와 관성상수이다. 발전기뿐만 아니라 계통 분리개소에서 모든 모선들은 관성 중심 주파수와 다른 자신들의 주파수를 가진다. 식 3의  $H_{system}$ 은 계통관성상수이며  $H_i$ 는 발전기  $i$ 에 대한 관성상수이다.

그림 3,4는 30번 모선과 35번 모선의 발전력 부족에 따른 주파수 저하 파형이다. 식3에 의한 계통관성상수

3.075[sec]에서 발전기 관성이 멀수록  $df/dt$ 의 동요가 크게 나타나고 있음을 그림 2에서 볼 수 있다. 35번의 발전기 모선의  $df/dt$ 의 동요가 가장 크게 나타났으며, 계통관성상수와 가장 근접한 30번 모선에서의 동요가 가장 적게 됨을 보았다.

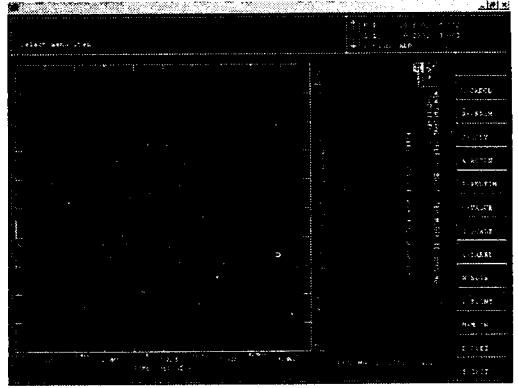


그림 2. 계통분리후 30모선과 35모선의  $df/dt$

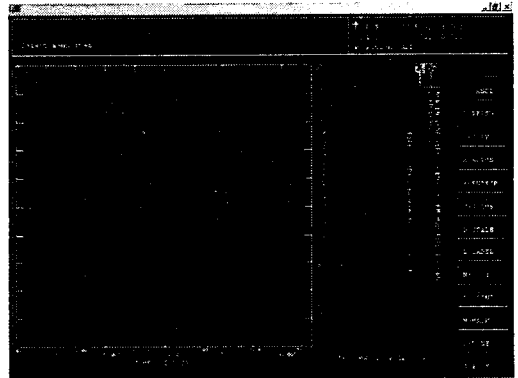


그림 3. 30번 모선 주파수

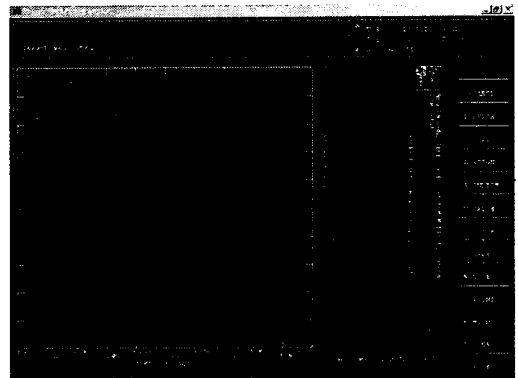


그림 4. 35번 모선 주파수

$$H = \frac{H_1 MVA_1 + H_2 MVA_2 + L + H_n MVA_n}{MVA_1 + MVA_2 + L + MVA_n} \quad (2)$$

표 1. New England 39 system의 발전기 관성

buses	#30	#31	#32	#33	#34
H	2.994	3.41	6.05	3.6	3.41
buses	#35	#36	#37	#38	#39
H	0.83	3.141	3.141	5.32	swing

이때, 과부하가 심화되어 계통이 붕괴됨을 방지하기 위하여 이  $df/dt$ 를 Under-frequency Relay에 적용하면 계통의 외란의 정도를 인지하여 Load shedding 크기를 결정한다면 현재의 정적인 차단량에서 보다 융통적인 계통 안정화 방안이 될 것이다.

### 3. 결 론

주파수 저하에 근거를 둔 전력계통 부하차단 방식은 빠르고 간단하며 신뢰할만한 전략이지만 몇 단점이 있다.  $df/dt$ 는 MW 불평형에 대한 직접적인 표시이다. 하지만  $df/dt$ 의 진동 성질은 측정을 신뢰할 수 없게 만든다. New England 39 Bus System 시험에 기초로 하여 다음과 같이 결론을 내린다.

1. 비율변화 주파수계전기는 중요 문제를 극복하기 위하여 비율 변화에 대한 평균값을 계산하여야 한다. 평균을 정확하게 계산하는데 필요한 시간은 실제적 응용에 사용하기에는 긴 시간이다. 비록 측정이 정확하다 할지라도 시스템 경계와 불평형이 예측되지 않는 한 적절히 계전기를 정정하는 것은 어렵다.
2. 주파수의 적응적인 정정과 주파수 미분 계전기들은  $df/dt$  기능의 이행을 더욱 효율적이고 신뢰성 있게 해준다. 이러한 정정들은 순동 예비력, 전체 시스템 관성, 부하 배분에 근거하여야 한다. 게다가 이러한 정보가 이용가능 하다면 차단되어야 할 실제적 부하를 주파수 미분  $df/dt$ 이 이용하여 계산할 수 있다. 고속 통신과 정교 평가 모델 또는 둘 중의 어느 하나가 정확한 평가를 위하여 필요하다. 계통 불안정이나 과부하 상황을 다루는데 있어서 시스템 분리 전에 적응형 부하차단이 바람직하다.

### [참 고 문 헌]

- [1] L. Celderblad and T. Cegrell, "A New Approach to Security Control of Power Systems Local Protection Coordinated with System Wide Operation," IFAC symposium, Sept. 1988.
- [2] J. F. Hauer, "An Applications Perspective of Advanced Measurement Technology in Wide Area Monitoring and Control", Phasor Meas. Conf., Washington DC, Oct. 1993.
- [3] D. Novosel and R. L. King, "Using Artificial Neural Networks for Load shedding to Alleviate Overloaded Lines" IEEE PES Winter Meeting, Feb. 1993, Paper 93 WM 036-4 PWRD
- [4] A. P. J. Malt et al, "Computer Based Supervisory Control and Energy Management System for the city of Cape town" IEE Proceeding, Vol. 135, pp.41-50. 1988.
- [5] L. H. Fink et al, "Emergency Control Practices" IEEE Trans. on PAS, Vol. 104, pp.2336-2441, Sep. 1985.
- [6] North American Electric Reliability Council, "System Disturbances:1986-1991" NERC Reports.
- [7] M. Mandozzi et al, "Recent Improvements of Emergency Control of ENEL Power System in Interconnected and isolated Operation" Proc. of CIGRE, Paper 39-302, Paris, 1992
- [8] Y. Ohura et al, "Microprocessor-based Stabilizing Control Equipment for Survival of Isolated Mid-City Power System" IEEE Trans. PWRD, pp.99-104, Oct. 1986.