

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

李昭嶸* · 張炳泰*** · 李在郁** · 吳和珍§ · 趙範燮§§ · 金在顯§§§
 (S. Y. Lee · B. T. Jang · J. W. Lee · H. J. Oh · B. S. Cho · J. H. Kim)

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 natural 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.

Key Words : Under Frequency Relay, Rate of Change of Frequency, Load Shedding

1. 서 론

전력계통에서의 외란은 대규모 발전력의 탈락 혹은 계통 주요개소의 고장과 같은 계통의 급작스런 변화의 형태를 야기한다. 긴급 상황의 경우에는 제어와 보호 명령들이 계통을 가능한 한 정상적이고 안전한 상태로 회복시키기 위하여 필요하다. 컴퓨터 및 측정 기술들의 활용 증가로 인하여 보다 넓은 계통보호범위가 가능해졌으며 전력계통 안정도를 향상시키기 위한 지역 상황에 사용되는 사고파급방지장치와 같은 것이 등장하였다. 본 논문에서는 전력계통의 주파수 안정도를 위하여 주파수 변화율의 기능 실행을 평가하였으며, 주파수 저하에 의한 계통의 안정도를 위한 동적부하차단 방안을 제안하였다. 전력계통 계획상의 경향을 살펴보면 경제적인 요인과 환경적인 요인에 의한 새로운 제약조건으로 인하여 운영 여유의 마진이 줄어들고 있는 추세이다. 동시에 민자 발전기, 독립 전력 생산자, 거래 증가, 경쟁 환경 및 새로운 장치들은 전력계통을 운영하고 제어하기에 더욱 복잡하게 만들었으며 따라서 외란에 더욱 취약하다. 광역 외란 보호의 개념에 대한 검출과 제어전략이 좋을수록 외란의 조정이 훨씬 쉽게 이루어지며 이것은 전력전송 및 운전의 경제성을 보다 높게 하는 중요한 기회를 나타내고 있다. 광역 외란 보호는 시스템의 광역 정보를 사용하고 전력계통의 주요한 외란의 파급을 막기 위하여 원거리에 위치한 곳에 해당지역의 정보를 보내는 개념이다.[1] 현재 운영되는 에너지관리시스템은

원방감시제어시스템과 다양한 전력계통 분석 도구에 의해 운영되고 있지만 현재의 집중제어명령들은 일부 외란의 경우에 대해서는 느리게 응답한다. 계통 운전자는 매우 복잡한 상황에 빈번히 직면해야 하고 자발적인 해와 정책에 의존하여야 하는 실정이다. 따라서 지역별 자동 명령들은 빠르게 확산되는 긴급한 상황으로부터 시스템을 보호하는데 여전히 의존적이다. 일반적인 계통의 저주파수 보호의 전략은 부하차단이지만, 주파수는 부하차단이 시작되기 전부터 이미 저하되고 있는 상태이다. 그러나 주파수 변화율은 전력 불평형의 순간 표시이며 보다 선택적이고 신속한 보호를 하기 위한 기능을 포함한다. 본 논문에서는 전력계통 안정도를 고려하는 주파수 저하 방지를 위한 부하차단의 방안을 제안한다.

2. 본 론

2.1 발전력 부족시의 저주파수 현상

회전기의 입력과 출력 간에 차가 발생시 회전기기의 회전속도가 변화하여 주파수가 변화하게 된다. 계통 입출력 변화시 주파수가 변화함은 수식 1에서 나타낸다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{M_i}{f} \cdot \frac{df}{dt} = \sum_{i=1}^n P_{in,i} - \sum_{i=1}^n P_{out,i} \quad (1)$$

저주파수 현상의 문제점으로는 터빈 블레이드의 공진, 보조기기와 터빈 제어계의 응동에 따른 보일러, 원자로의 불안정 현상 등이 발생할 수 있다. 이는 플랜트 운전 가능 주파수가 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다. 그리고 발전기기 고장의 장기화로 인한 파장은 경제적으로 큰 손실이 발생한다. 전력서비스 공급자로서 부하차단방법을 취한다는 것은 바람직하지 않지만, 전력산업구조개편에서 경제성을 고려한다면 위급한 주파수 저하 사고시의 계통안정화 대책으로는 부하차단 방안이 가장 경제적이며 최선의 선택이 되게 될 것이다.

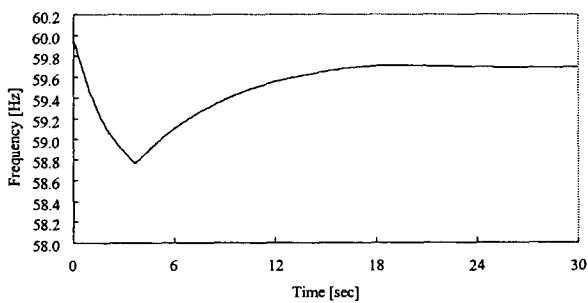
* 正會員 : 韓國電力公社 電力研究員 委囑研究員
 ** 正會員 : 韓國電力公社 電力研究員 一般研究員
 *** 正會員 : 韓國電力公社 電力研究員 先任研究員
 § 正會員 : 韓國電力去來所 課長
 §§ 正會員 : 韓國電力去來所 部長
 §§§ 正會員 : 順天大 電氣制御工學科 副教授 · 工博
 接受日字 : 2002年 10月 17日
 最終完了 : 2003年 4月 23日

2.2 저주파수 부하차단

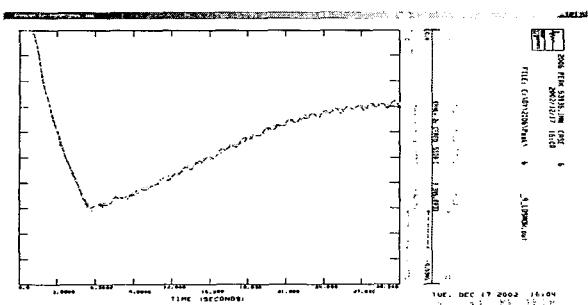
저주파수 부하차단(Under Frequency Load Shedding)의 주된 목적은 정상 운전값에서 벗어난 주파수를 정상운전범위 내의 회복을 위하여 계획된 부하의 양을 차단하는 것이다. 일반적인 저주파수 부하차단은 사전 결정된 계획에 기초를 두고 있으며 계통 상황을 극복할 수 있도록 개조 시킬 수가 없다. 따라서 특별한 시스템의 특성과 전력회사 방침에 기반을 둔 부하차단 방식의 적용사례가 다양하게 제시되고 있다. 일반적으로 현재 저주파수 부하차단 방식은 몇 가지 단점을 가지고 있다.

- (a) 차단하도록 지정된 부하는 사전에 선정된 계통의 상정 사고 해석에 근거하여 가정한 부하배분에 좌우된다. 지정된 부하들은 탈락될 것이나 예기치 않은 계통변화에 대해 최적 부하 차단량을 보장할 수 없으므로 과차단이나 부족차단이 발생된다.
- (b) 무효전력 배분과 전압 특성이 고려되지 않는다. 송전선로의 무부하와 동시에 부하차단은 과전압을 일으킬 수 있다[4,5]. 높은 분로 커패시턴스를 가지는 케이블 계통망에서 비제어 부하 차단방식은 전압상승을 일으킬 수 있는데 이는 부하차단이 비효율적일 수 있다[6].
- (c) 부하는 불연속적인 단계별로 차단된다. 실제적인 전력 부족분을 예측할 수 없기 때문에 부하의 정확한 양이 차단되지 않을 수도 있다.

그림 1은 2006년도 최대 부하시 계통을 PSDB(Power System Data Base)와 PSS/E 두 가지 방법으로 모의 실험하였다. 사용된 PSDB는 부하차단 정책을 수립하는 현장 실무자들이 사용하는 부하차단 프로그램이다[13]. 실험 대상 계통은



(a) PSDB



(b) PSS/E

그림 1 발전(5900MW) 탈락시 주파수
Fig. 1 Frequency under generation deficiency

모선 1430개, 발전기 190기, 부하 957개, 선로 2221개, 변압기 415개로 구성되어 있으며, 저주파수 사고 모의는 정상 운전시 발전기 6기(5900MW)를 탈락시켜 30[sec]동안 모의하였다. 2가지 모의 결과에서 저주파수 부하차단은 1단계(58.8Hz)가 동작하였으며 현재 부하차단을 모의하는 PSDB는 부하차단 프로그램이며 계통의 동적모의는 할 수 없다. PSS/E에서 동적모의 결과 외란 전과 후의 계통상태는 표 1과 같다. 계통 주파수의 부하차단이 되어서 경감된 부하와 계통 병입 중인 발전기의 순동예비력(Regulating Reserve)이 자동적으로 응답한 결과로 주파수가 59.5Hz 이상으로 나타났다.

표 1 시간에 따른 계통상태

Table 1 Power system status by time

PSS/E	MW	t=0 [sec]	t=30 [sec]
stage 1	Generation	53436.1	51158.4
	Load	52613.8	50407.3

2.3 주파수 변화율

그림 2는 전력계통에서 저주파수 현상의 4가지 대표적인 유형을 나타내고 있다. 그림 2의 (d)의 경우에서 강인한 계통이거나 부족 발전력이 작을수록 주파수 하강 기울기가 완만하게 된다[7]. 이와 대조적인 계통에서는 주파수 하강 기울기가 급박하게 되어 주파수 안정도에 취약한 계통으로 간주된다. 이와같이 계통 관성의 변화에 따른 부족발전력으로써 주파수 감소율은 상이하게 나타난다. 각기 다른 계통특성에 따라 정확한 차단량을 매번 정정시킨다는 것은 매우 어려운 일이다. 주파수 변화율은 저주파수 계통보호에 적용하면 계통 외란에 따른 현재 부하차단보다 신속하며 적용적인 계통 보호 방안이 될 것으로 사료된다.

그림 3과 같은 39모선 계통에서 2-25, 26-27 선로 탈락으로 계통을 분리시켜 저주파수 계통 상황을 모의하였다. 모의 시험 계통을 1.0[sec]까지 정상 운전시키고 1.0[sec] 시점에 선로를 탈락하여 계통을 분리시키고 부족발전력 지역의 계통 주파수 추이를 관찰하였다

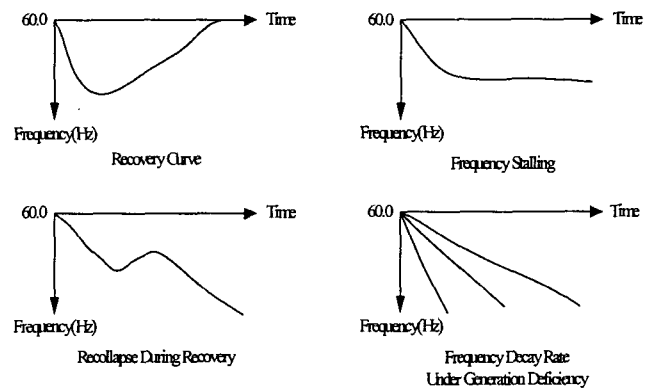


그림 2 주파수 저하의 형태
Fig. 2 Form of frequency decline

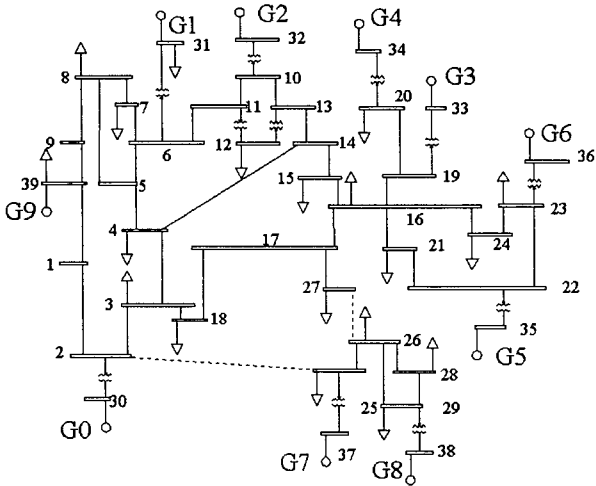


그림 3 뉴잉글랜드 39 모선 계통
Fig. 3 New England 39 Bus system

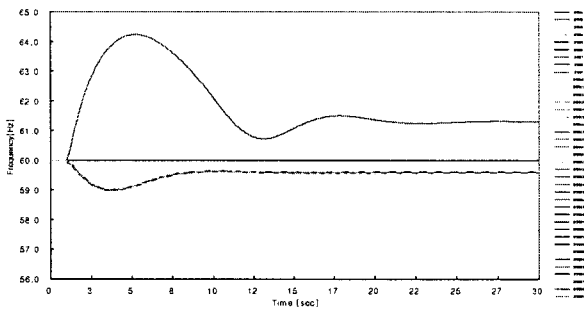
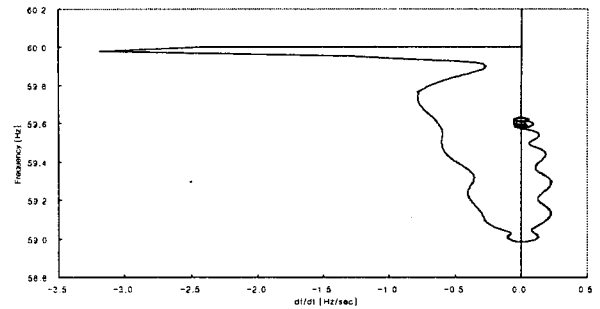


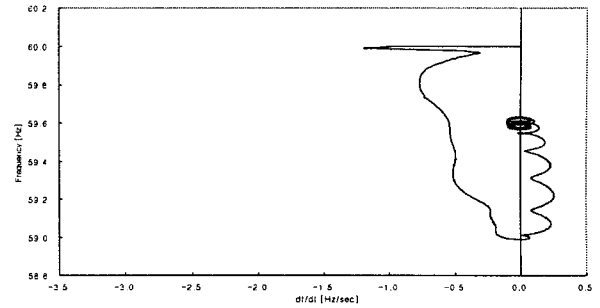
그림 4 New England 39 모의 계통 동적 모의
Fig. 4 Dynamic simulation of New England 39 bus system

그림 4에서 주파수가 상승한 지역은 발전력이 많은 지역이고 주파수가 하강한 지역은 발전력이 부족한 지역이다. 주파수 저하를 보이는 지역이 관심지역으로서 4997.0[MW] 발전력과 5497.8[MW] 부하로서 주파수 저하 현상이 발생하였다. 그림 5는 2번 모선과 35번 모선에서의 주파수-주파수변화율 파형이다.

2번 모선에서는 최대 주파수 변화율을 보였고 35bus에서는 최소 주파수변화율을 보였다 이 39모선 모의계통 실험에서 주파수 변화율이 각 모선별로 다르게 나타나는 현상을 보게 되었다. 이 현상은 주파수 변화율이 외란의 크기를 반영하는 요소로서 기존의 순차적 부하차단에 비하여 주파수변화율은 부하차단의 동적 순간 지표가 될 것이다. 모의 계통에서 주파수변화율 크기 추이는 외란직후 약 2사이클 시점까지는 큰 폭으로 변동하지만 2사이클 이후에는 소폭으로 동요하면서 일정값에 머무르고 있다. 10.0[sec]이후에서는 조속기특성 및 부하특성으로 인해서 계통의 주파수가 약 59.5[Hz]값으로 회복 상승되었다. 주파수변화율의 특징은 외란 초기에 대해서 사고의 크기가 반영됨을 39모선 계통 모의실험에서 볼 수 있었다. 2.4절에서는 주파수 변화율 특성을 국내 실계통에서 동적 부하차단방안에 적용함으로써 주파수 변화율을 이용하는 동적부하차단을 시행하였다.



(a) 2 bus



(b) 35 bus

그림 5 사고 후 주파수-주파수변화율 곡선

Fig. 5 Frequency to rate of frequency decay after disturbance accident

2.4 동적부하차단 모의 분석

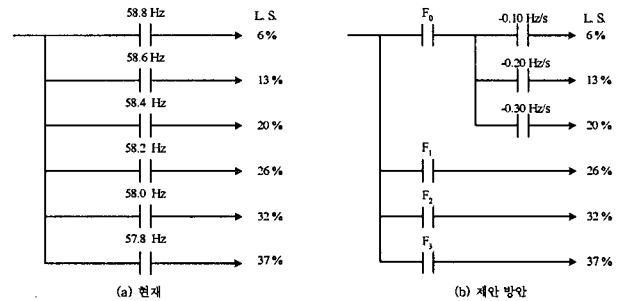
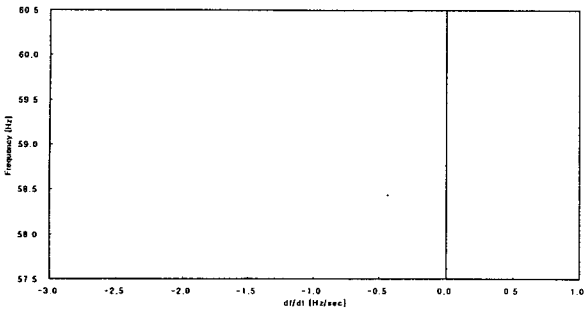


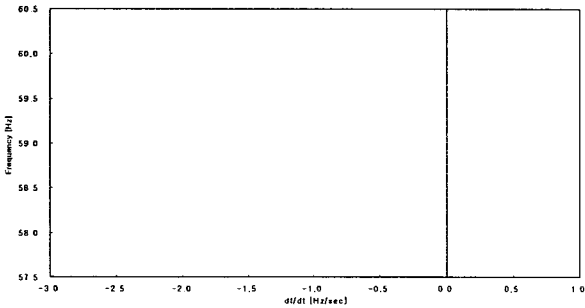
그림 6 저주파수 부하차단 방안

Fig. 6 Under frequency load shedding scheme

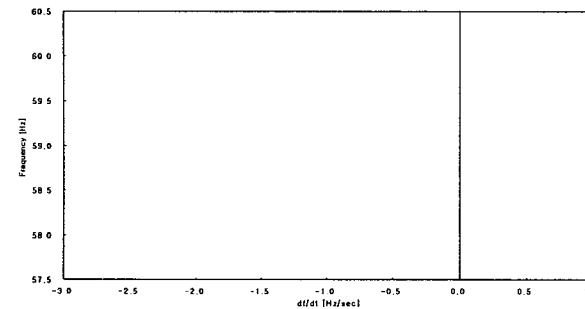
그림 6 (b)의 주파수변화율을 적용한 동적부하차단 제안방안을 적용하기위해 5900[MW] 발전력 탈락으로서 국내전력계통의 주파수 하강시 동적부하차단을 모의하여 하였다. 부하차단 초기 설정 주파수로서 60[Hz] 운전되는 계통에서 주로 사용되는 초기 부하차단 주파수인 59.5[Hz], 59.1[Hz], 58.8[Hz] 3가지 초기 주파수 방안으로 모의 하고 차단양은 현재 운용하는 부하차단 방안과의 동일한 조건으로 하였다. 발전기 6기 탈락으로 관심대상의 모선별 최대 주파수변화율은 1400모선에서 -0.8[Hz/sec], 5500모선에서 -0.7[Hz/sec], 7100 모선에서 -2.364[Hz/sec]으로 나타난다. 사고 발전단과 관측한 3모선 중에 사고지점과 가장 인접한 7100모선에서 최대 주파수변화율이 관측이 되었다. 이는 주파수 변화율 크기가 사고의 지점으로부터의 거리에 관계되는 것을 보여준다.



(a) 1400 bus



(b) 5500 bus

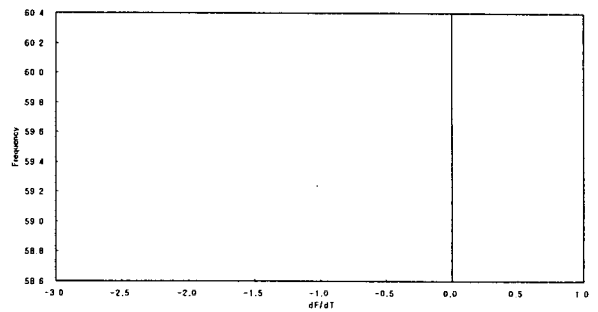


(c) 7100 bus

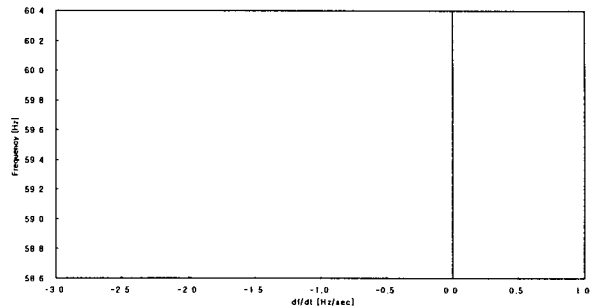
그림 7 UFR 부하차단 미시행시 각 모선의 주파수-주파수변화율 곡선

Fig. 7 Frequency to rate of frequency decay of each bus without load shedding of UFR

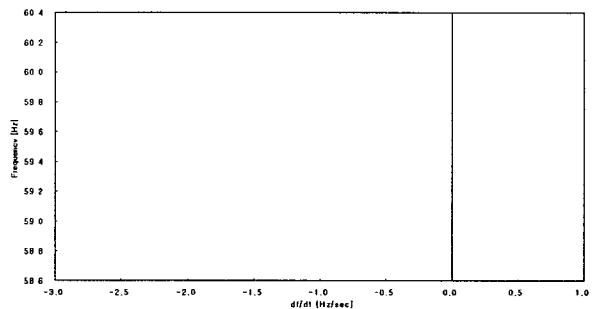
본 논문에서 제안하는 주파수 변화율은 저주파수시에 사고의 파급을 막기 위해 전기적으로 가장 인접한 부하들을 계통에서 탈락시키게 되는 중요 지표가 될 것이다. 주파수 변화율의 크기에 따라 각각의 모선에서 바라보는 저주파수 계전기는 1단계, 2단계, 3단계 동작이 차등적으로 적용되어 차단량이 기존 방안보다 저주파수 계통 보호에 선택적이 될 수 있음을 보여준다. 현재 활용중인 저주파수 부하차단계획은 그림 6의 (a)와 같은 방안이며 이 방안에 추가하여 효과적인 방안으로 그림 6 (b)와 같은 동적 요소를 추가한 방안이 되겠다. 초기 주파수 단계에 변화율의 적용 즉, 외란 발생시 주파수 변화율 단계가 적용되어 현재 방안보다 더 효과적으로 주파수 회복시킬 수 있다. 초기설정주파수와 각 단계별 차단량은 기존 차단량과 동일하게 적용하여 모의실험 하였으며, 이 초기 주파수의 선정은 중요하게 된다. 초기 차단 주파수가 너무 높은 값으로 설정시키면 저주파수계전기가 빈번히 동작



(a) scheme 1



(b) scheme 2



(c) scheme 3

그림 8 7100 모선의 초기 주파수 정정 사례별 주파수-주파수변화율 곡선

Fig. 8 Frequency to rate of frequency decay by early frequency setting example of 7100 bus

하게 될 것이고, 초기 차단 주파수가 너무 낮게 설정된다면 부하차단이 되더라도 하더라도 계통이 주파수 붕괴될 수도 있다. 3가지 방안의 모의실험 결과에서 전부 59.5[Hz] 이상의 주파수로 회복된 모의시험이었으며 3가지 방안 모두가 동적 부하차단의 효용성을 입증하였다. 그림 9에서 발전기 6기 탈락 모의 주파수 파형의 결과에서 방안 2가 가장 적은 부하를 차단하고 연속운전가능 범위 주파수에 가장 근접하게 회복하였으므로 가장 효과적이 방안으로 사료된다. 표3은 본 논문의 실험에서 제안하는 동적부하차단 방안이 적용된 초기주파수의 설정에 따른 발전과 부하의 시간에 따른 변화를 나타낸다. 주파수변화율을 저주파수 보호 방안에 활용되어지면 저주파수 상황의 신속한 제거 효과와 전력계통의 안전한 운영을 위한 주파수 안정도 향상에 기대할 수 있다.

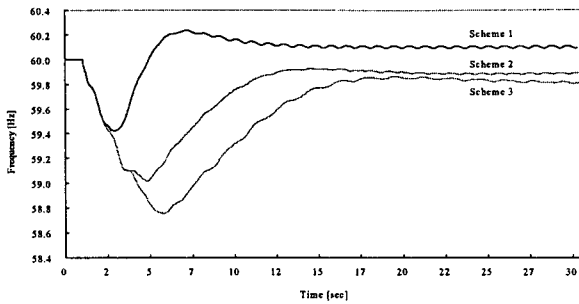


그림 9 동적부하차단 방안을 적용한 부하차단에 따른 7100 모선의 모의 주파수

Fig. 9 Frequency of 7100 bus by load shedding that applied dynamic load shedding scheme

표 2 부하차단 방안 사례별 설정

Table 2 Setpoint by load shedding scheme

	Frequency[Hz]	Stage	df/dt[Hz/sec]	% L. S.
Scheme 1	59.5	1	-0.1	6
	59.5	2	-0.2	7
	59.5	3	-0.3	7
Scheme 2	59.1	1	-0.1	6
	59.1	3	-0.3	7
Scheme 3	58.8	1	-0.1	6
	58.8	2	-0.2	7
	58.8	3	-0.3	7

표 3 사례별 시간에 따른 계통상태

Table 3 System state by time classified by scheme

	MW	t=0 [sec]	t=30 [sec]
Scheme 1	Generation	53436.1	45540.4
	Load	52613.8	44900.4
Scheme 2	Generation	53436.1	48863.3
	Load	52613.8	48178.3
Scheme 3	Generation	53436.1	48806.3
	Load	52613.8	48136.5

3. 결 론

저주파수에 따른 부하차단은 전력계통 주파수를 빠르게 안정시키며 신뢰할 만한 전략이다. 주파수변화율이 적용된 부하차단방안은 발전력과 부하의 불평형에 대한 적극적인 조치이며 New England 39 Bus System과 KEPCO 계통의 동적 부하차단 모의실험 결과로서 초기주파수 정정과 주파수 변화를 계전기들의 수행을 입증함으로써 계통 운영을 더욱 신뢰성 있게 만든다. 이러한 저주파수 계전기의 정정은 예비력, 계통 관성, 부하 배분에 근거한 정보를 활용 가능할 때, 차단 되어질 실제적 부하를 UFR에 정정할 수 있게 된다. 본 논문에서 제안하는 동적부하차단을 시행함에 있어 정밀한 계통 데이터 취득과 상세 계통 모델의 평가가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 한국전력거래소 연구비(과제번호:01P-J06) 지원으로 이루어졌으므로 이에 감사드립니다.

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] 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.
- [4] L. H. Fink et al, "Emergency Control Practices" IEEE Trans. on PAS, Vol. 104, pp.2336-2441, Sep. 1985.
- [5] 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
- [6] 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.
- [7] Shih, L.J.; Lee, W.J.; Gu, J.C.; Moon, Y.H. "Application of df/dt in Power System protection and its implementation in microcontroller based intelligent load shedding relay" Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1991. Conference Record. Papers presented at the 1991 Annual Meeting, 1991
- [8] 한국전력공사, "전력계통의 동기탈조 보호계전장치 운용에 관한 연구", 1989
- [9] 한국전력공사, "지역급전의 전력계통 해석업무 전산화 연구", 1995
- [10] 한국전력공사, "적정주파수 관리방안 및 주파수 유지율이 산업계에 미치는 영향조사", 1999
- [11] 한국전력공사, "系統保護 데이터베이스 構築에 관한 연구", 1992

저 자 소개



이 소 영 (李昭嶸)

1974년 12월 26일 생. 2001년 순천대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~현재 전력연구원 전력시스템기술그룹 위촉연구원

Tel : 042-865-7816, Fax : 042-865-5844

E-mail : sylee@kepri.re.kr



오 화 진 (吳和珍)

1963년 12월 19일 생. 2000년 부산대학교 산업대학원 전기공학과 졸업. 1981년 한국전력공사 입사. 2001년~현재 한국전력거래소 계통기술처 근무

Tel : 02-3456-6752, Fax : 02-3456-6757

E-mail : ohpro@kpx.or.kr



장 병 태 (張炳泰)

1964년 12월 23일 생. 1999년 충남대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 한국전력공사입사. 1992년~현재 전력연구원 전력시스템기술그룹 선임연구원

Tel : 042-865-5841, Fax : 042-865-5844

E-mail : tbjang@kepri.re.kr



조 범 섭 (吳和珍)

1954년 8월 21일 생. 1974년 조선대학교 이공대학 졸업. 1996년 발송배전기술사. 1974년 한국전력공사 입사. 2001년~현재 한국전력거래소 계통보호팀장

Tel : 02-3456-6750, Fax : 02-3456-6757

E-mail : cbsf@kpx.or.kr



이 재 욱 (李在郁)

1972년 1월 10일 생. 1995년 포항공과대학교 전자전기공학과 졸업. 1997년 포항공과대학원 전자전기공학과 졸업(석사) 1997년~현재 전력연구원 전력시스템기술그룹 일반연구원

Tel : 042-865-5848, Fax : 042-865-5844

E-mail : caesar@kepri.re.kr



김 재 현 (金在顯)

1956년 1월 25일 생. 1977년 홍익대학교 전기공학과 졸업, 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사), 1993년 동대학원 졸업(박사). 현재 국립 순천대학교 정보통신 공학부 부교수

Tel : 061-750-3545

E-mail : jhg@sunchon.ac.kr