

碩士學位論文

주파수 변화율을 이용한
제주 전력계통의 부하차단계획 연구

指導教授 李 開 明



濟州大學校 產業大學院

電子電氣工學科

高 錫 範

2000

주파수 변화율을 이용한
제주 전력계통의 부하차단계획 연구

指導教授 李 開 明

이 論文을 工學碩士學位 論文으로 提出함

2000年 6月 日

濟州大學校 産業大學院

電子電氣工學科(電氣工學)





高 錫 範

高錫範의 工學碩士學位 論文을 認准함.

2000年 6月 日

委員長 左 宗 根 印 

委 員 김 일 환 印 

委 員 이 개 명 印 

목 차

LIST OF TABLES	iii
LIST OF FIGURES	iv
SUMMARY	v
I. 서 론	1
II. 저주파수 Relay와 부하차단	3
1. UFR에 의한 부하차단	3
2. UFR의 적용현황	4
가. 고려사항	4
나. 제주계통의 UFR 운전현황	4
III. 주파수 변화율 Relay	7
1. dF/dt Relay의 동작원리	7
2. 제주계통의 동적주파수 특성	8
IV. 과도안정도 해석	10
1. 개 요	10
2. 과도안정도 해석 프로그램의 실행 방법	12
V. 시뮬레이션에 의한 전력계통의 과도안정도 평가	17
1. 계통 조건	17
2. 현 UFR 부하차단 방식	17

3. dF/dt 부하차단 방식	18
4. 시뮬레이션 수행 결과	19
VI. 결 론	20
참고문헌	21



LIST OF TABLES

Table 1 The five steps of load shedding as the frequency decreases in Cheju power system	5
Table 2 The process to analyze transient stability ..	11



LIST OF FIGURES

Fig. 1 Frequency drop by generation deficiency	1
Fig. 2 Frequency recovery characteristics according to load shedding by UFR in the state of generation deficiency	3
Fig. 3 Frequency recovery characteristics according to load shedding ..	8
Fig. 4 The flow chart to analyze transient stability	10
Fig. 5 Data conversion process during PSSDS4 program running	12
Fig. 6 Define the states of the generators during PSSDS4 program running	13
Fig. 7 Generation of the output file	14
Fig. 8 Parameter values obtained by the simulation	15
Fig. 9 Simulation results for present load shedding scheme	18
Fig. 10 Simulation results for dF/dt load shedding scheme	19

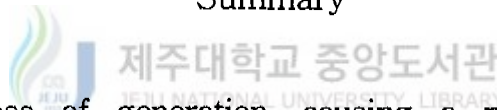
A Study on the Load Shedding Scheme for Cheju Power System using Rate of Frequency Decline

Suk-Bum Ko

Department of Electronic and Electrical Engineering
Graduate School of Industry
Cheju National University

Supervised by professor Gae-Myoung Lee

Summary



A sudden loss of generation, causing a mismatch between energy supply and energy demand, will result in a system frequency drop. If governor action cannot activate spinning reserve quickly enough to restore the system to its normal operating frequency, under-frequency load shedding(UFLS) serves a last resort tool to prevent system from collapse. Most UFLS schemes use prespecified step sizes based upon frequency measurements. This paper presents UFLS scheme which uses both frequency and the rate of frequency decline. The proposed method sheds load when the rate of frequency decline is greater than a preset value. Simulation results show that the proposed scheme has the ability of fast frequency recovery in Cheju power system.

I. 서론

전력계통이 정상 주파수로 안정하게 운전될 때에 계통의 총 발전력과 총 부하량 및 손실은 균형을 갖춘 상태가 된다. 그러나 발전기가 갖는 발전용량(기계력)과 부하가 갖는 부하량(전기력)의 균형이 무너지면 발전기의 속도가 변화하고 결국 이에 비례하여 계통의 주파수 변화가 발생한다.

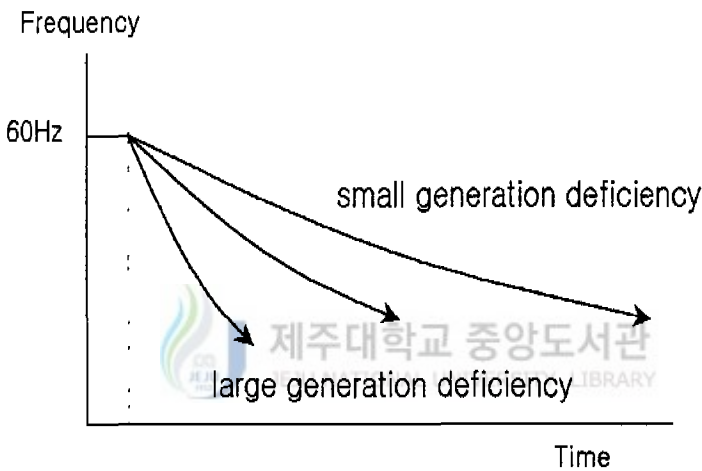


Fig. 1 Frequency drop by generation deficiency

Fig. 1의 미소한 수급 불균형은 발전기의 조속기로 조정이 가능하지만 갑작스런 발전력의 부족이 발생하면 신속한 부하차단을 통하여 주파수를 회복시킴으로써 계통의 파급 사고를 최소한도로 방지하고 있다.

한편 발전기들은 주파수 저하에 대단히 민감한데 그 이유는 첫째 보일러 급수펌프와 같은 모터 구동장비들의 속도가 떨어져 발전기 출력을 감소시키기 때문이다. 대부분의 발전기들은 57[Hz]이상 주파수에서 운전되고 있다. 둘째 이유로서는 주파수가 58[Hz]이하로 내려갈 경우 스팀 또는 가스

터빈의 저압 블레이드가 공진으로 손상될 가능성이 있다는 것이다. 따라서 일반적으로 발전기들은 주파수를 58[Hz]이상의 상태에서 운전되도록 계전기 보호하고 있다.

1997년 11월부터 우리나라에서는 처음으로 해남과 제주간에는 해저 케이블에 의한 직류송전이 운용되고 있다. 직류송전 Bipole 용량은 300[MW]이며 송전전압은 $\pm 180[\text{kV}_{\text{dc}}]$ 이다. 최근 제주계통의 평균부하는 약 200[MW]에 달하며 현재 정상운전일 경우 제주 총전력수요의 1/2을 직류송전으로 공급받고 있다. 직류송전 기술은 유효전력을 고속으로 제어한다는 점에서 매우 우수한 계통특성을 갖고 있으나 보호제어 관점에서 교류계통과의 협조가 매우 중요하다.

국내에서 처음 운용되는 직류송전시스템은 그동안 초기의 운전단계에서 갑작스런 직류송전계통 운전정지로 제주 전지역 정전을 비롯한 많은 계통의 파급사고를 경험한 바 있다. 직류송전이 중단될 경우 제주에는 발전력의 부족으로 주파수 저하현상이 빈번하게 발생되어 이를 해소하기 위하여 제주파 계전기 (Under Frequency Relay ; UFR)에 의한 부하차단방식이 적용되고 있다. 그러나 이러한 방식은 직류송전에 의한 송전전력이 제주계통의 약 절반을 차지하고 있는 경우 직류송전이 불시 정지될 때에는 과부하율이 약 200%에 달하여 주파수가 매우 급격히 저하하므로 효율적인 부하차단이 매우 어려우며 따라서 계통주파수가 과도하게 저하하여 제주 전지역 정전을 야기할 가능성이 높아진다.

본 논문에서는 계통의 주파수저하시 신속하게 최소한의 부하를 차단할 수 있도록 디지털 dF/dt Relay를 이용한 효율적인 부하차단방식에 관한 연구를 수행하였다. 또한 본 연구는 제주지역의 실제 데이터를 이용하여 여러 운전조건 및 고장 상황에 대하여 과도안정도 해석을 실시하였으며 dF/dt 계전기의 적용에 관하여 분석하였다.

II. 저주파수 Relay와 부하차단

1. UFR에 의한 부하차단

심각한 과부하로 인한 급격한 주파수 저하는 조속기나 보일러의 응동으로 해결할 수 없으며 과부하와 같거나 그 이상의 부하량을 차단하여야 한다. 주파수가 정상으로 회복되면 발전기의 예비력과 대기 발전기를 가동하면서 부하들을 다시 조금씩 복귀시키게 된다.

일반적으로 UFR에 의한 계통 주파수 회복의 특성(S. H. Horowitz et al, July 1971)은 Fig. 2와 같다.

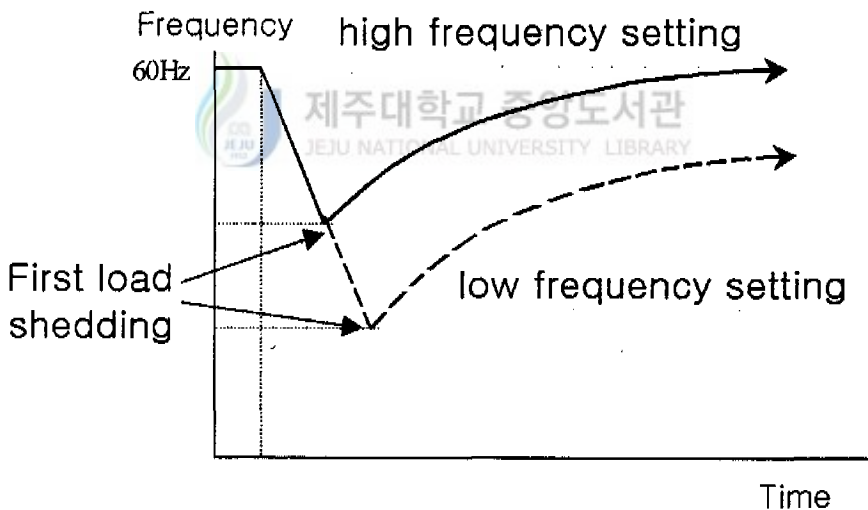


Fig. 2 Frequency recovery characteristics according to load shedding by UFR in the state of generation deficiency

주파수는 과부하 조건을 판정하는 지표로서 매우 신뢰성이 높다. 따라서

UFR을 사용하여 자동으로 부하를 차단함으로써 계통을 안정하게 유지하고 정전을 최소화 할 수 있다.

2. UFR의 적용현황

가. 고려사항

일반적으로 UFR에 의한 계통의 부하차단 계획을 설계할 경우 다음과 같은 사항들을 고려하고 있다.

- 예상 최대 과부하량
- 부하차단 단계 수
- 각 단계별로 차단될 부하량
- 주파수 정정치
- 지연 시간
- 저주파 Relay 모션위치

나. 제주계통의 UFR 운전현황

제주계통에 대한 UFR차단 D/L별 부하현황은 Table 1에서와 같이 계통의 부하를 225.2[MW]로 선정하고 5단계로 부하차단을 실시하도록 되어있다. 총 계통부하의 51%에 대하여 UFR 차단부하를 확보하도록 계획하고 있으며 확보율은 약 98%이다. 즉 제주계통부하의 절반까지 직류송전선으로 수전할 경우 불시정전이 되어 200% 과부하 상태가 되더라도 부하차단을 통한 계통유지가 가능하도록 UFR 운영방침을 마련하고 있다.

Table 1 The five steps of load shedding as the frequency decreases in Cheju power system

Step (%) (Total shedding load)	Frequency [Hz]	Substation	D/L	Average shedding load [kW]
First (11%) (26,070[kW])	59.0	신제주	명 주	5,756
		성 산	성 수	3,355
			삼 달	1,127
		안 덕	상 대	1,008
			신 평	2,207
동제주	부 두	8,922		
Second (11%) (18,780[kW])	58.8	북제주	해 안	2,267
			오 동	4,118
		한 라	한 남	1,881
			위 미	3,524
		신서귀	선 반	5,403
			탐 라	1,587
Third (11%) (22,562[kW])	58.4	북제주	북 광	3,175
		동제주	용 담	4,327
			일 도	4,982
		한 라	민 속	1,449
			대 성	2,119
		조 천	조 천	6,510
Fourth (11%) (18,088[kW])	58.0	안 덕	호 근	2,634
		동제주	이 도	5,497
			서 문	959
			신 촌	3,141
		조 천	제 동	3,110
			김 녕	2,747
Fifth (7%) (19,897[kW])	57.6	신제주	장 전	8,423
			신 업	6,630
			교 래	2,611
			제 원	1,579
			서 부	654
Summation		8 S/S	29	105,397

그러나 실제 계통의 운전상황에서는 계획된 부하량은 달라질 수 있으며 이를 고려하여 UFR을 운용할 필요가 있다.

제주계통의 UFR 차단계획에서 특이한 점은 육지의 대형 계통과는 달리 제주계통이 직류송전을 운용하고 있으며 약소계통인 점을 감안하여 육지계통에서는 1차 차단 주파수가 58.8[Hz] 인데 반하여 제주계통은 59.0[Hz]로 정정하고 있다는 것이다. 이는 Fig. 2에서와 같이 부하저하시 부하차단을 미리 실시하도록 주파수를 정정함으로써 계통주파수가 최소한으로 떨어지도록 고려한 것으로 판단된다.

현재 제주계통에서 수립되어 있는 UFR 운영방침에 대해서는 V장에서 기술된 과도안정도 시뮬레이션 결과를 통하여 보다 자세히 논한다.

III. 주파수 변화율 Relay

1. dF/dt Relay의 동작원리

계통에서 주파수가 너무 급격하게 떨어지면 주파수 저하가 과도하게 되어 발전기들 자체의 보호시스템이 동작하여 발전기가 정지되어 결국 발전력 부족이 더 심각해져 안정도 자체가 위협해진다. 그러므로 이 경우 부하 차단계획에서는 주파수 변화율(dF/dt)을 고려하는 것이 매우 효과적이며 GE, ABB 등에서 디지털 방식의 Relay(DFF series 1000, 1999), (Applied Protective Relaying, 1979)가 제품화 되어있다. 이러한 Relay들은 정해진 시간동안 주파수 미분값을 계산하며 정적인 주파수 및 동적인 주파수 변화율(미분값)에 대하여 동작하게 된다(C. J. Durkin Jr., E. R. Eberle et al, June 1969).

앞서 언급한 바와 같이 주파수 변화는 계통의 발전력과 부하의 균형이 깨지면서 발생하며 특히 주파수 변화율은 계통의 전력부족에 밀접한 관계를 갖는다(문영환, 윤재영, 최홍관, 외, 1999).

$$\Delta f = \frac{(P_m - P_e)}{2 * H_{SYS}} \quad (1)$$

여기서 Δf 는 60[Hz]를 기준으로 한 pu 값으로 주파수 변동율이고, $(P_m - P_e)$ 는 발전력과 부하의 차이로서 계통에 연결된 발전기 MVA의 총합을 기준으로 한 pu 값이며, H_{SYS} 는 계통의 등가 관성정수이다.

식(1)에서 주파수 변화율 Δf 를 정확하게 계산한다면 발전력 부족을 즉시 예측할 수 있으며 이 때 dF/dt Relay의 주파수 변화율 정정에 따라 일반 UFR 보다 빠르고 신속하게 부하차단을 실시함으로써 계통의 최저 주파

수를 개선시키고 불필요한 추가 부하차단을 방지하게 된다. 즉 계통의 상황이 결국 차단되어야 할 발전력 부족으로 결정되면 주파수가 더 떨어지기 전에 미리 부하를 차단하기 위해서 주파수 변화율 Relay를 사용한다.

2. 제주계통의 동적 주파수 특성

Fig. 3은 1999년 6월 14일 오후 5시 경 실측된 제주계통의 동적인 주파수 특성이다(문영환, 윤재영, 최홍관, 외, 1999).

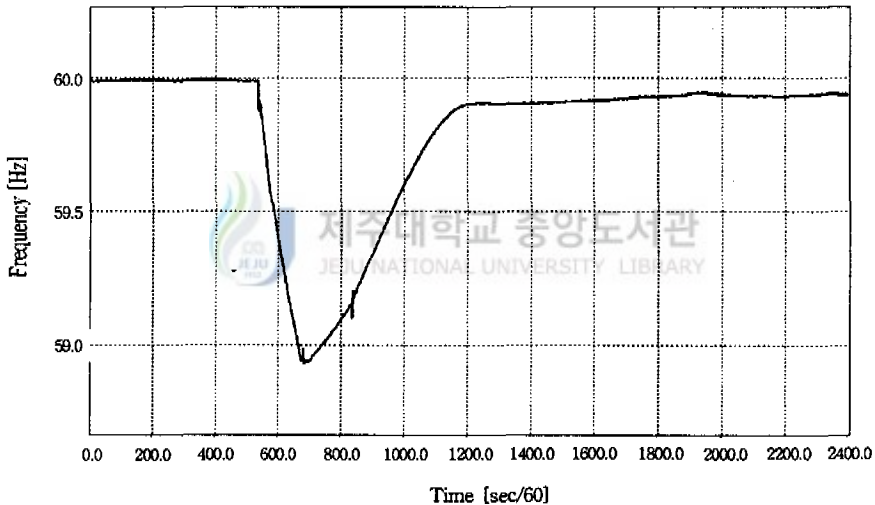


Fig. 3 Frequency recovery characteristics according to load shedding

사고 직전 제주계통의 운전상황은 전체부하가 206.6[MW]이었으며 해남-제주 HVDC #1 Pole 연계선로만을 정전력 모드에서 30.0[MW]로 운전중 고장이 발생되었다. 고장원인은 #2 Pole 연계선로를 Go To Service 후 가압하는 순간에 #1 Pole 연계선로가 Trip 되어 30.0[MW]의 발전력 부족현상이

발생하였다. 이에 따라 제주 전체 계통의 주파수가 저하하면서 UFR 1단계 동작 (주파수 59.0[Hz]에서 1차 부하차단)함으로써 5개 변전소의 5개 D/L이 차단된 것이다.

식 (1)의 계통 동요방정식을 이용하여 Fig. 3의 주파수 저하시에 의하여 계산되어지는 관성정수 값은 2.84[sec]로서 발전기들만의 가중평균 관성정수 2.14[sec]보다 크게 나타나는데, 그 이유는 계통에 포함된 동력부하 등의 관성이 포함된 결과인 것으로 추정된다.



IV. 과도안정도 해석

1. 개 요

과도안정도 해석의 목적은 전력계통에 가해진 충격에 대한 시스템의 응답상태를 구하는 것으로 매 시간 및 구간별 각 상태변수의 미분값이 계산되고 주어진 정수, 변수값 및 현재의 조건들을 사용하여 다음 구간 후의 상태를 계산한다. Fig. 4는 과도안정도 해석을 위한 기본 흐름도이며, 과도안정도 수행 과정은 Table 2에 나타내었다.

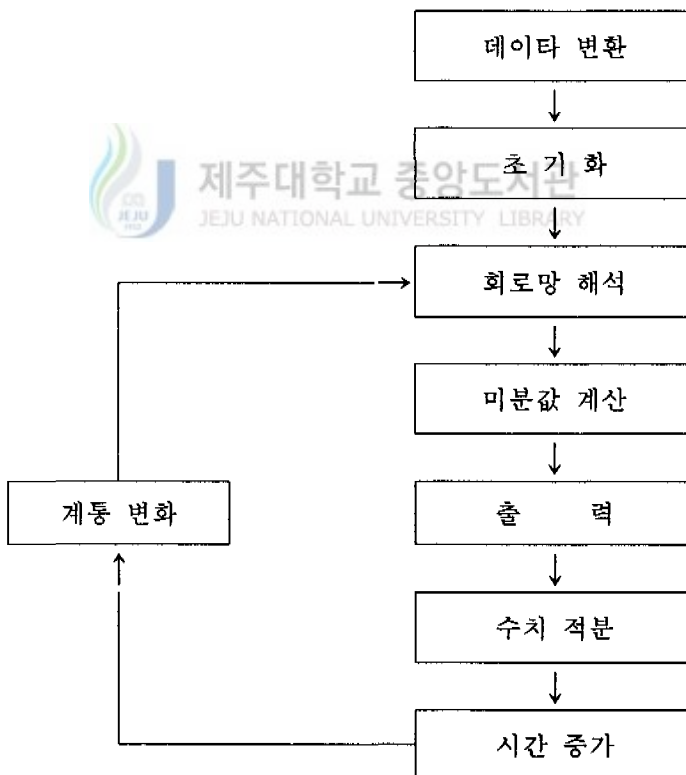


Fig. 4 The flow chart to analyze transient stability

Table 2 The process to analyze transient stability

수 행 단 계	실 행 (명령어)	사용된 파일
1. 조류계산 수행	Lofl	PSSDS4.exe 기동후 발전기 나 부하의 변환 데이터 저장
2. DS 원시데이터 작성	Save	Raw데이터파일 실행후 Sav 파일로 저장
3. Conec, Conet 부프로그램 작성 및 출력 채널 지정	Dyre	초기 동적 해석의 스냅샷 파 일로 저장
4. Conec, Conet 프로그램의 컴파일과 실행파일 만들	Snap	Text 에디터 사용 DOS로 이동후 DBOS 기동 포트란 사용
5. 모든 Var, State 값의 초 기값 구함	Stat	출력 채널 화일
6. PSS/E 멈춤 및 데이터의 정확성 검토		
7. 초기 스냅샷 라인 입력	Rstr	초기 스냅샷 파일
8. 초기 조류계산 데이터 입 력(발전기와 부하가 변환 된 파일)	Case	초기 조류계산 데이터
9. 초기 동특성 해석(외란이 전)	Stat Run	
10. 외란의 지정 및 계산, 대 상 시간까지 계산	Altr Run	
11. 최종 상태의 스냅샷 파일 저장	Snap	최종 스냅샷 화일
12. 최종 조류 계산내에서의 조류계산 결과 저장후 그 래프 출력		최종 상태 조류 계산 파일

2. 과도안정도 해석 프로그램의 실행 방법

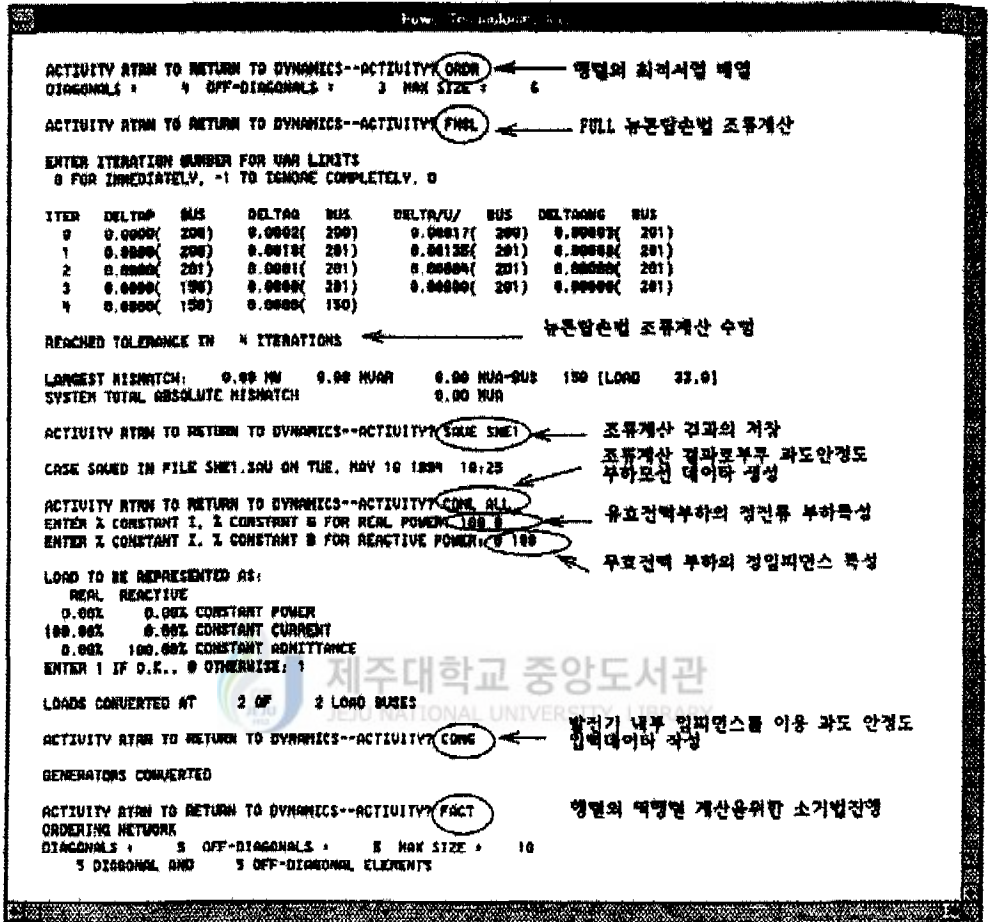


Fig. 5 Data conversion process during PSSDS4 program running

- 1) PSSDS4를 실행한 후 조류계산 모듈(Lofl)에서 파일을 읽고, 가우스 자이델법, 뉴턴 랩슨법으로 조류계산 파일을 재차 읽어 조류계산결과를 저장한다.
- 2) Fig. 5 과정이 실행되면 조류계산 결과로부터 과도안정도 해석용 데이터가 형성된 것이다.

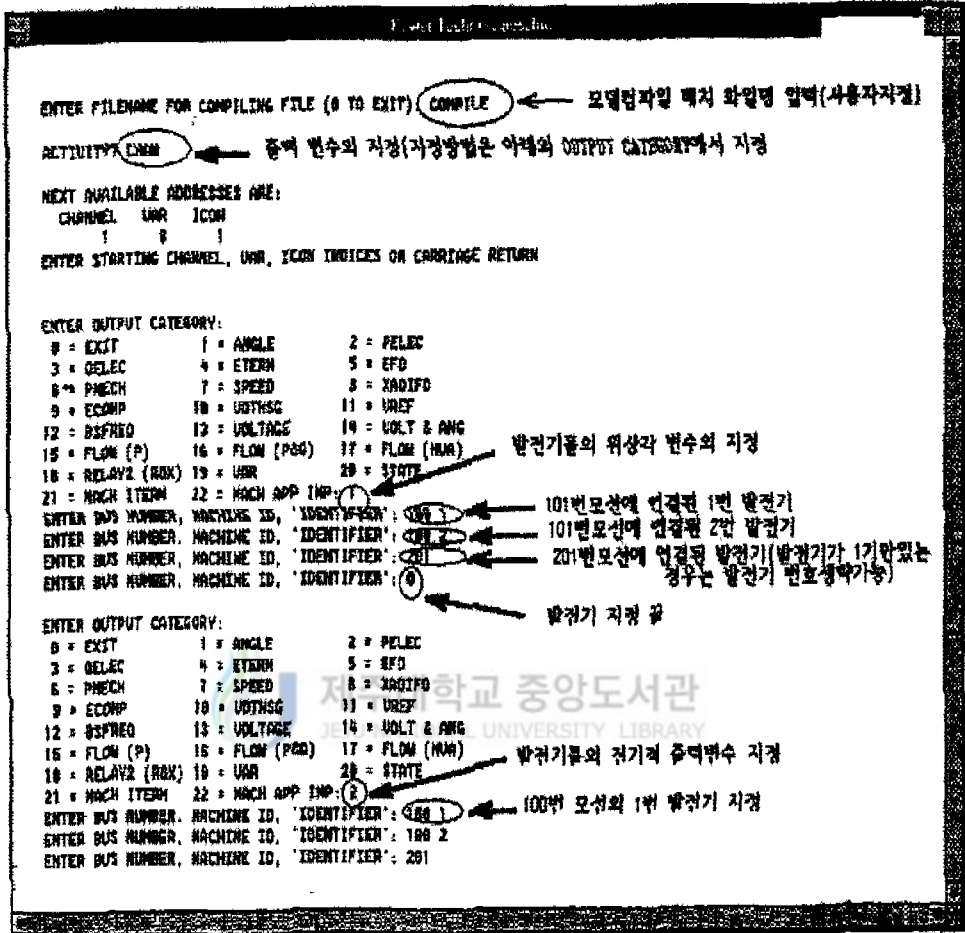


Fig. 6 Define the states of the generators during PSSDS4 program running

- 3) 조류계산 결과 생성된 파일을 읽어들이고, 과도안정도 파일과 조합하여 발전기와 관련된 동적모델 ccl.flx파일, 회로망에 관련된 동적모델 cti.flx파일을 자동적으로 만들어 낸다.
- 4) Fig. 6 과정은 만들어진 동적파일을 컴파일하여 출력될 변수를 지정하는 것이다.

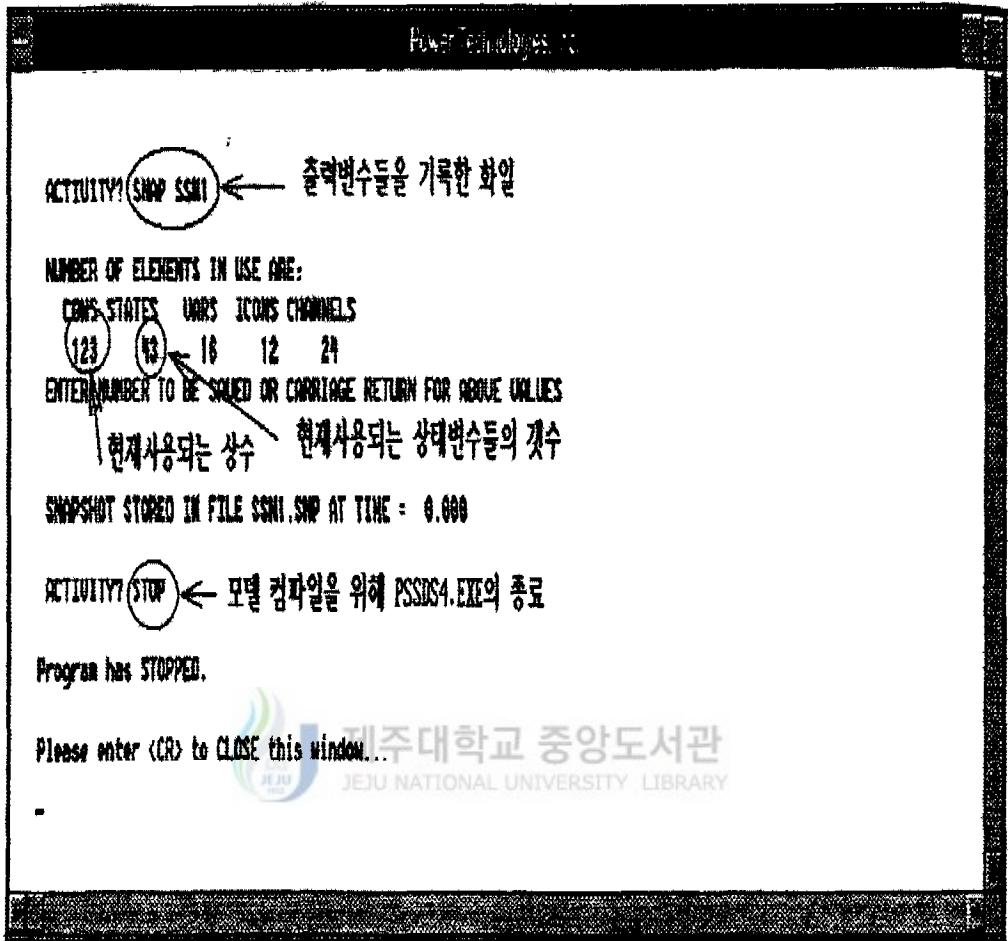


Fig. 7 Generation of the output file

- 5) Fig. 7 과정에서 과도안정도 계산 결과가 기록되는 스냅샷 파일을 생성한다.

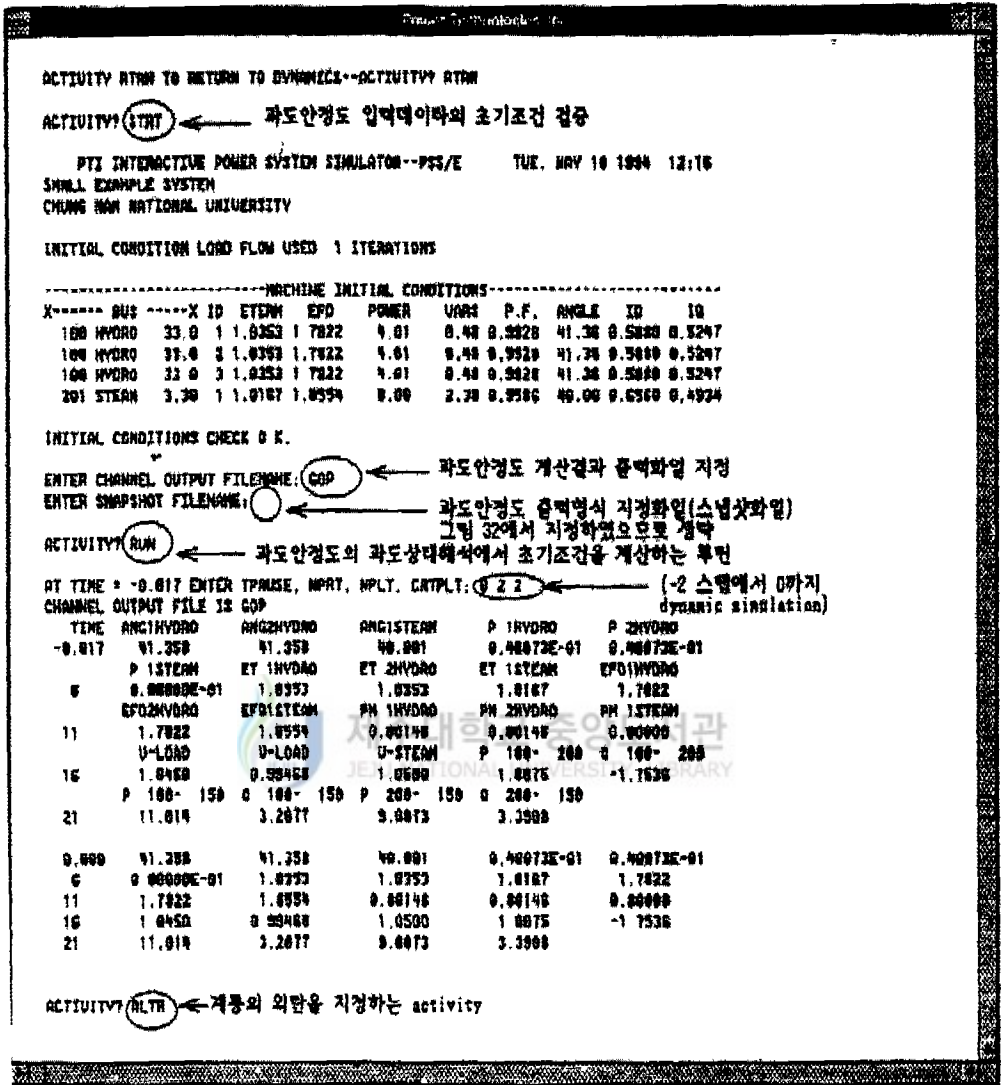


Fig. 8 Parameter values obtained by the simulation

6) 만들어진 스냅샷파일을 실행하여 과도안정도 초기 조건을 작성한다.

7) "Stat" 과 "Run" 명령을 실행하여 과도안정도를 구하는 과도상태해석의 입력 데이터 값을 계산한다.

- 8) 정상계통에 대해 작성된 과도안정도 초기조건을 그대로 이용하고, 계통에서 외란의 발생을 “Aitr” 로 실행하여 지정하면 외란시 과도안정도를 구하는 과도상태해석의 입력 데이터 값이 계산된다.

- 9) Fig. 8 과정이 완료되면 계통의 외란시 계산된 이 입력데이터 값을 프로그램에 입력하여 최종 부하차단의 단계에 따른 주파수 회복 특성이 얻어진다.

V. 시뮬레이션에 의한 전력계통의 과도안정도 평가

1. 계통 조건

직류송전시스템의 불시정지에 의한 제주 계통의 부하차단 방식의 효용성을 검증하기 위하여 과도안정도 해석을 실시하였다. 계통의 조건은 부하량을 일정하게 하고 직류송전 전력을 총부하의 35%, 50%로 가정하여 초기조건을 작성하였다. 이와 관련하여 계통 무효전력 분포 및 직류송전시스템의 무효전력 운전양상이 실제와 동일하도록 조정하였다. PSS/E program(제조사 : USA Power Technologies. Inc.)을 이용한 과도안정도 해석에서는 직류송전 전력이 손실된 직후 주파수 저하 양상과 이에 따른 UFR 및 dF/dt Relay 적용에 의한 계통 주파수 회복과 전압변동을 관찰하였다.

2. 현 UFR 부하차단 방식

총부하의 35%, 50% 직류송전 전력 손실에 대해서 현 UFR 차단방식에 의한 효과를 검토하기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9는 현 UFR 차단방식에 의한 결과를 나타낸 것이다.

총부하의 35% 직류송전 전력 손실의 경우는 모선 주파수가 1.5[sec] 부근에서 59[Hz] 정도로 저하되었다 3.5[sec] 부근에서 새로운 주파수 평형점으로 도달된다. 그리고 총부하의 50% 직류송전 전력 손실의 경우는 모선 주파수가 1[sec] 부근에서 58.6[Hz] 정도로 저하되었다 3.5[sec] 부근에서 새로운 주파수 평형점으로 도달된다.

VI. 결 론

본 논문에서는 현재 제주전력계통에서 운용되고 있는 저주파수 계전기에 의한 부하차단 방식을 분석하고, 보다 효율적이고 안정적인 부하차단을 위하여 주파수 변화율 릴레이를 사용한 차단방식을 도입 적용하여 그 효과를 분석하였다.

이를 위하여 직류계통은 제주전력계통 총부하의 35%, 50%를 송전중 일시 정지에 의한 전력계통의 과도 안정도 모의해석을 실시한 결과 주파수 변화율 릴레이에 의한 부하차단시 주파수 회복 특성이 기존 부하차단 방식에 비해 월등함을 입증하였다.

또한 제주전력계통과 같이 규모가 적은 계통에 주파수 변화율 릴레이에 의한 부하차단 방식 적용시 효과 더욱 클 것으로 예상된다.

앞으로 제주계통에 주파수변화율 릴레이의 최적 운용을 위해서는 정정에 대한 심층적인 연구와 주파수 회복시 오버슈트 발생을 최소화 할 수 있는 방지대책이 요구된다.

참고문헌

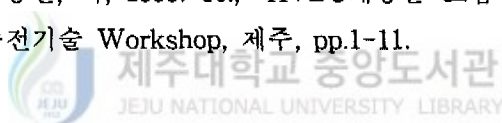
S. H. Horowitz et al, July 1971, Frequency Actuated Load Shedding and Restoration. II-Implementation, IEEE Trans. on PAS, Vol.90, pp.1460-1468.

Instructions GEK 106166A, GE, "Digital Frequency Relay, DFF series 1000", 1999.

Westinghouse, "Applied Protective Relaying" , 1979.

C. J. Durkin Jr., E. R. Eberle et al, June 1969, An Underfrequency Realy with Frequency Decay Rate Compensation, IEEE Trans. on PAS, Vol.88, pp.812-820.

문영환, 윤재영, 최홍관, 외, 1999. 10., "HVDC계통을 포함한 제주계통의 동적 특성 분석", HVDC 송전기술 Workshop, 제주, pp.1-11.



감 사 의 글

지난 2년 반 동안의 노력이 이제야 조그만 결실을 거두게 되었습니다. 그 동안 저의 학위 논문이 완성되기까지 많은 관심을 가지고 물심양면으로 지도와 격려를 아끼지 않으셨던 이개명 지도교수님과 김세호 지도교수님께 먼저 깊은 감사를 드립니다.

대학원 생활에 늘 관심을 가지고 많은 가르침과 조언을 해주신 좌종근 교수님을 비롯하여 오성보교수님, 김일환교수님, 김호찬 교수님께도 심심한 사의를 표합니다.

또한 주위에서 대학원 생활을 할 수 있도록 유익한 조언을 해주신 한국전력 제주지사 김태익 과장님께 감사드리며, 자료정리에 도움을 준 안진호 선생과 한성훈 선생 그리고 한국전력에 근무하는 송철용, 고지훈군에게도 고마운 마음을 전합니다.

아울러 오늘이 있기까지 헌신적인 희생으로 내조를 해준 사랑하는 나의 아내 강문재와 세 자녀 인수, 민정, 경태와도 본 논문의 출간의 기쁨을 함께 나누고자합니다.

끝으로 긴 세월동안 은갓 어려움을 참으시고 항상 사랑과 희생으로 보살펴 주시다 유명을 달리하신 아버님과 홀로 계신 어머니님, 그리고 항상 격려와 배려를 하여주신 장인어르신을 비롯한 처가집 식구에게 이 논문을 드리며, 형제 가족들과 주위에서 도움을 주신 모든 분들에게 기쁨을 전합니다.

2000년 6월 일
고 석 범 드림