濟州大學校 産業技術硏究所 論文集, 第10卷, 2號, pp.163-167, 1999. 12
Cheju Nat'l Univ. Res. Insti. Ind.Tech. Jour., Vol.10, No.2 pp.163-167, 1999. 12

주파수 변화율을 이용한 제주 전력계통의 부하차단계획 연구

고 석 범* · 김 세 호**

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

Suk-Bum Ko* and Se-Ho Kim**

ABSTRACT

A sudden loss of generation, causing a mismatch between energy supplied and energy demanded, 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, underfrequency load shedding(UFLS) serves a last-resort tool to prevent system from collapse. Most UFLS schemes use pre-specified 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 freqyency decline is greater than a pre-set value. Simulation results show that the proposed scheme has the ability of fast frequency recovery in Cheju Power System.

Key words : Underfrequency load shedding(UFLS), rate of frequency decline, transient stability, power system

Ⅰ. 서 론

전력계통이 정상 주파수로 안정하게 운전될 때에 계통의 총 발전력과 총부하량 및 손실은 균형을 갖춘 상태가 된다. 그러나 발전기가 갖는 기계력과 부하가 갖는 전기력의 균형이 무너지면 발전기의 속도가 변화하고 결국 이에 비례하여 계통의 주파수 변화가 발생한다.

Fig. 1의 미소한 수급 불균형은 발전기의 조속기로 조정이 가능하지만 급작스런 발전력의 부족이 발생하면 신속한 부하차단을 통하여 주파수를 회복시킴으로써 계통의 사고파급을 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] 이상에서 운전되고 있다. 둘째 이유로서는 58[Hz] 이하로 내려갈 경우 스팀 또는 가스 터빈의 저압 블레이드가 공진으로 손상될 가능성이 있다는 것이다. 따라서 일반적으로 발전기들은 58[Hz] 이상의 계통상태에서 운전되도록 계전기로 보호하고 있다.

1997년 11월부터 우리나라에서는 처음으로 해남과

* 제주대학교 산업대학원
Graduate School of Industry, Cheju Nat'l Univ.
** 제주대학교 전기공학과, 산업기술연구소
Dept. of Electrical Eng., Res. Insti. Ind. Tech., Cheju Nat'l Univ.

제주간에는 해저 케이블에 의한 직류송전이 운용되고 있다. 직류송전 Bipole 용량은 300[MW]이며 송전전압은 ±180[kV_{dc}]이다. 최근의 제주계통의 평균부하는 약 200[MW]에 달하며 정상운전일 경우 제주부하의 1/2을 직류송전으로 공급받고 있다. 직류송전 기술은 유효전력은 고속으로 제어한다는 점에서 매우 우수한 계통특성을 갖고 있으나 보호제어 관점에서 교류계통과의 협조가 매우 중요하다.

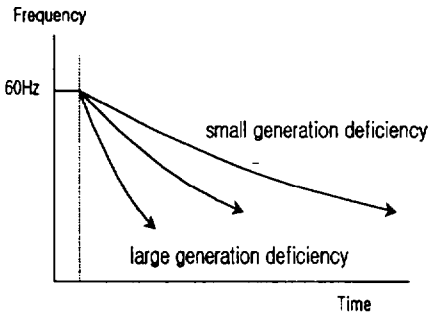

Fig. 1 Frequency drop by the amount of generation deficiency

국내에서는 처음 운용되는 직류송전시스템은 그동안 초기의 운전단계에서 급작스런 직류송전계통 운전정지로 제주지역 전정전을 비롯한 많은 계통의 파급사고를 경험한 바 있다. 직류송전이 중단될 경우 제주에는 발전력의 부족으로 주파수 저하현상이 빈번하게 발생되어 이를 해소하기 위하여 저주파 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 광역정전을 야기할 가능성이 높아진다.

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

II. 저주파수 Relay와 부하차단

2.1. UFR에 의한 부하차단

심각한 과부하로 인한 급격한 주파수 저하는 조속기나 보일러의 반응으로 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 특성은 Fig. 2와 같다.

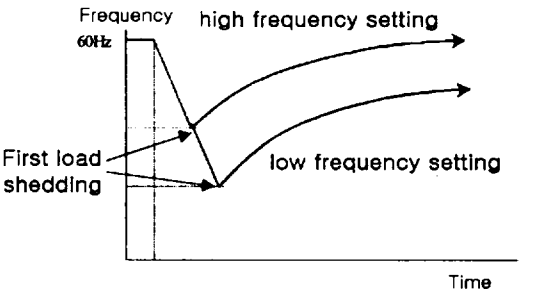

Fig. 2 Frequency recovery by UFR in generation deficiency

주파수는 과부하 조건을 판정하는 지표로서 매우 신뢰성이 높다. 따라서 UFR을 사용하여 자동으로 부하를 차단함으로써 계통을 안정하게 유지하고 정전을 최소화 할 수 있다.

2.2. UFR의 적용현황

2.2.1. 고려사항

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

- 예상 최대 과부하량
- 부하차단 단계 수
- 각 단계별로 차단될 부하량

- 주파수 정정치
- 지연 시간
- 저주파 Relay 모선위치

2.2.2. 제주계통의 UFR 운전현황

제주계통에 대한 UFR차단 D/L별 부하현황은 Table 1에서와 같이 계통의 부하를 225,200[kW]로 선정하고 5단계로 부하차단을 실시하도록 되어있다.

Table 1 Frequency setting of five step scheme 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 엄	6,630
			교 래	2,611
			제 원	1,579
			서 부	654
Summation		8 S/S	29	105,397

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 Scheme을 마련하고 있다.

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 육지 계통에서는 1차차단 주파수가 58.8[Hz] 인데 반하여 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 Scheme에 대해서는 Ⅳ에서 기술된 과도안정도 시뮬레이션 결과를 통하여 보다 자세히 논한다.

Ⅲ. 주파수 변화율 Relay의 적용

3.1. *dF/dt* Relay의 동작원리

계통에서 주파수가 너무 급격하게 떨어지면 주파수 저하가 과도하게 되어 발전기들 자체의 보호시스템이 동작하여 발전기가 증지되어 결국 발전력 부족이 더 심각해져 안정도 자체가 위험해진다. 그러므로 이 경우 부하차단계획에서는 주파수 변화율(*dF/dt*)을 고려하는 것이 매우 효과적이며 GE, ABB 등에서 디지털 방식의 Relay가 제품화 되어있다. 이러한 Relay들은 정해진 시간동안 주파수 미분값을 계산하며 정적인 주파수 및 동적인 주파수 변화율(미분값)에 대하여 동작하게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 주파수 변화는 계통의 발전력과 부하의 균형이 깨지면서 발생하며 특히 주파수 변화율은 계통의 전력부족과 다음과 같이 밀접한 관계를 갖는다:

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

식(1)에서 Δf는 60[Hz]를 기준으로 한 pu 값이고,

($P_m - P_e$)는 발전력과 부하의 차이로서 계통에 연결된 발전기 MVA의 총합을 기준으로 한 pu 값이며, H_{SYS}는 계통의 등가 관성정수이다. 그러므로 주파수 변화율 Δf를 정확하게 계산한다면 발전력 부족을 즉시 예측할 수 있으며 이 때 dF/dt Relay의 주파수 변화율 정정에 따라 일반 UFR 보다 빠르고 신속하게 부하차단을 실시함으로서 계통의 최저 주파수를 개선시키고 불필요한 추가 부하차단을 방지하게 된다. 즉 계통의 상황이 결국 차단되어야 할 발전력 부족으로 결정되면 주파수가 더 떨어지기 전에 미리 부하를 차단하는 것이 주파수 변화율 Relay의 원리이다.

3.2. 제주계통의 동적 주파수 특성

Fig. 3은 1999년 6월 14일 오후 5시 경 실측된 제주계통의 동적인 주파수 특성이다.

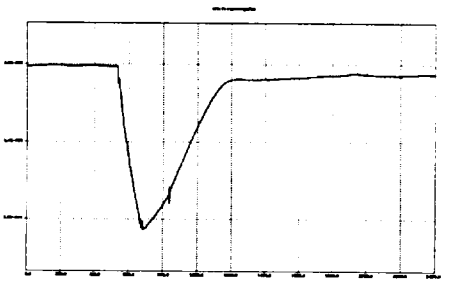

Fig. 3 Frequency response of load disturbances

사고 직전 제주계통의 운전상황은 전체부하가 206.6 [MW]이었으며 해남-제주 HVDC #1 Pole만이 정전력 모드에서 30.0[MW]로 운전 중이었다. 고장원인은 #2 연계선로를 Go To Service 후 가압하는 순간에 #1 연계선로가 Trip 되어 30[MW]의 발전력 부족현상이 발생하였다. 이에따라 제주 전체 계통의 주파수가 저하하면서 UFR이 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 저하시 에 의하여 계산되어지는 관성정수 값은 2.84[sec]로서 발전기들만의 가중평균 관정정수 2.14 [sec]보다 크게 나타나는데, 그 이유는 계통에 포함된 모터부하 등 관성이 포함된 결과인 것으로 추정된다.

Ⅳ. 과도안정도 시뮬레이션

4.1. 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 program을 이용한 과도안정도 해석에서는 직류송전 전력이 손실된 직후 주파수 저하 양상과 이에 따른 UFR 및 dF/dt Relay적용에 의한 계통 주파수 회복과 전압변동을 관찰하였다.

4.2. 현 UFR 부하차단 방식

총부하의 35%, 50% 직류송전 전력 손실에 대해서 현 UFR 차단방식에 의한 효과를 검토하기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 4는 현 UFR 차단방식에 의한 결과를 나타낸 것이다.

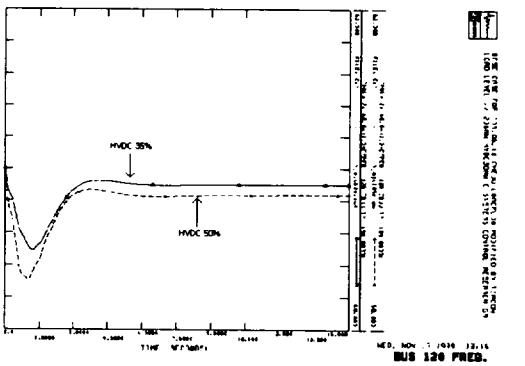

Fig. 4 Simulation result for present load shedding scheme

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.

4.3. dF/dt 부하차단 방식

총부하의 35%, 50% 직류송전 전력 손실에 대해서 dF/dt 부하차단 방식에 의한 효과를 검토하기 위해서 시뮬레이션을 수행하였다.

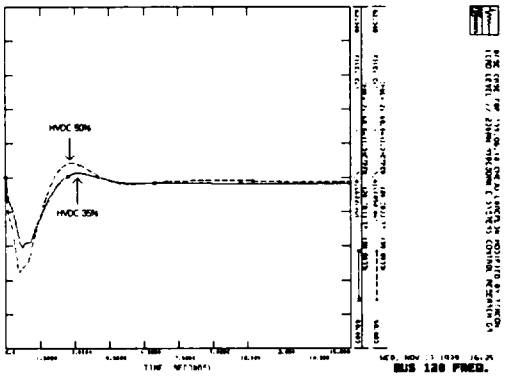

Fig. 5 Simulation result for dF/dt load shedding scheme

Fig. 5는 dF/dt 부하차단 방식에 의한 결과를 보여주는 것이다. 총 부하의 35% 직류송전 전력 손실의 경우는 모선 주파수가 0.7[sec] 부근에서는 59.2[Hz] 정도로 저하되었다가 3.5[sec] 부근에서 새로운 주파수 평형점으로 도달된다. 그리고 총부하의 50% 직류송전 전력 손실의 경우는 모선 주파수가 0.5[sec] 부근에서 58.9[Hz] 정도로 저하되었다 3.5[sec] 부근에서 새로운 주파수 평형점으로 도달된다.

Fig. 4와 5에서 dF/dt에 의한 부하 차단 방식이 현 부하차단 방식 보다 계통외란에 대한 주파수 제어 목적으로는 더욱 우수한 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 현재 제주계통에서 사용되고 있는 저주파수 계전기에 의한 부하차단방식을 검토하였으며 보다 효율적이고 안정적인 부하차단을 위하여 디지털 *dF/dt* Relay를 사용한 보호방식을 고려하여 그 적용 효과를 분석하였다. 이를 위하여 직류계통이 제주 계통의 총부하의 35%, 50%의 송전을 하다 불시정지에 의한 제주계통의 과도 안정도 모의해석을 실시하였으며 *dF/dt* Relay의 설치 타당성을 입증하였다.

제주계통에 *dF/dt* Relay의 최적 운용을 위해서는 정정에 대한 심층적인 연구가 요구된다.

참고문헌

1) S. H. Horowitz et al, July 1971, Frequency Actuated Load Shedding and Restoration: II-Implementation, IEEE Trans. on PAS, Vol.90, pp.1460-1468.
2) 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.
3) GE, 1999, Digital Frequency Relay, DFF series 1000 Instructions GEK 106166A.
4) 1979, Applied Protective Relaying Westinghouse.
5) 문영환, 윤재영, 최홍관 외, 1999. 10. HVDC계통을 포함한 제주계통의 동적 특성 분석, HVDC 송전기술 Workshop, 제주.