

最適負荷制限方式의 決定과 運用에 관한 研究

論 文

A Study on the Determination and Application of the Optimum Load Shedding Schemes

34~1~4

宋 吉 永*

(Kil-Yeong Song)

Abstract

During Severe emergencies which result in the case of outage of large generator units, an automatic underfrequency protection scheme can prevent the system frequency from decaying and improve the system stability.

This paper presents methods and results of a study on the optimum load shedding scheme which covering as follows.

- 1) Detail representation of governor model
- 2) Determination of optimum load shedding amount
- 3) Selection of action time settings of UFR
- 4) Comparsson of load shedding programs

By this study, the optimum system operating method was recommended for reliable operation of power system.

1. 머리말

近年 전력계통은 수요의 급증에 따라 그 규모가 확대 일로에 있다. 특히 그 중에서도 발전기의 單機容量이 대형화되고 또한 전원의 집중화가 급속하게 이루어짐에 따라 이른바 大電源탈락사고의 위험이 증대되고 있으며 이에 따른 계통동요의 억제대책이 새로운 계통문제로서 많은 관심을 모으고 있다.^{1), 2)}

이러한 대전원사고는 최근에 와서 부하페턴이 첨두부하와 심야경부하와의 격차증대로, 즉 深夜率이 나빠짐에 따라 특히 심야경부하시에 사고발생의 심각성이 더욱 큰 현상문제로서 대두되고 있다.

필자는 이러한 대전원탈락시의 계통동요특성 및 이의 보호대책을 저주파수계전기에 의한 자동부하제한이라는 측면에서 연구보고한 바 있으나^{3)~5)} 본 연구에서는 다시 최근의 계통현황을 감안하여

가) 조속기 모델의 정밀표현

나) 순동에너지 고려한 소요부하제한량의 산정과 이의 적정배분

다) 저주파수계전기 (Under Frequency Relay 이하 UFR 라고 함) 정정에서의 동작시간배분 라) 고장발생 확률을 고려한 부하제한방식의 비교 등을 포함시켜 보다 종합적인 측면에서 이른바 최적 부하제한방식의 결정과 이의 협조운용에 관하여 연구 검토한 결과를 간단히 정리해서 보고하고자 한다.

2. 計算方法

2.1 전원탈락시의 주파수특성

본 연구에서는 전력계통을 1기등가계통으로 가정하였다. 먼저 동기기의 운동에너지는 $\frac{1}{2}I\omega^2$ 이다. 이때 정격주파수 f_0 에 있어서의 운동에너지를 W^0 라고 한다면 주파수가 f_1 일때의 운동에너지 W^1 은 $W^0 \left(\frac{f_1}{f_0}\right)^2$ 으로 된다. 따라서 지금 ΔP_G 의 탈락사

고 발생하였을 경우 ($P_{G0} - \Delta P_G = P_G$) 동기기 운동방정식은 손실을 무시한다면 다음과 같이 된다.

*正 會 員 : 高麗大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 1984年 10月 31日

$$P_G(1+\mu) - (P_L - \Delta P_L) = \frac{d}{dt} W^1 \quad (1)$$

단 μ : 조속기에 의한 발전기출력의 증가율 [%]
(동상 순등에비력이라고 부르고 있다)

ΔP_L : 계통주파수의 저하에 따라 감소될 부하 [MW]

여기서

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} W^1 &= \frac{d}{dt} \left[W^0 \left(\frac{f_1}{f_0} \right)^2 \right] \\ &= 2W^0 \frac{f_1}{f_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{f_0 - \Delta f}{f_0} \right) \\ &= -2W^0 \frac{f_1}{f_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) \\ &= -2HP_r \frac{f_1}{f_0} \frac{d}{dt} \left(\frac{\Delta f}{f_0} \right) \quad (2) \end{aligned}$$

($\because W^0 = HP_r$)

로 된다.

단 H : 전원의 단위관성정수 [초]

P_r : 계통의 정격용량 [MVA]

(2) 식을 (1) 식에 대입하고 계통의 부하주파수 특성 정수 K_L 에 관한 관계식 $\frac{\Delta P_L}{P_L} = K_L \frac{\Delta f}{f_0}$ 를 사용해서 정리하면

$$\frac{d}{dt} (\Delta f) = \frac{f_0 \left[\frac{P_L - P_G(1+\mu)}{K_L P_L} \right] - \Delta f}{\frac{2HP_r}{K_L P_L}} \quad (3)$$

를 얻는다.

즉, 전원탈락시의 계통주파수 변화는 (3)식으로 표현되는데 이의 구체적인 계산은 조속기에 의한 발전기출력의 증가율 μ 가 일정하다고 볼 수 있을 정도의 미소시간구간 Δt 에 대해서 修正 Euler 법을 적용하므로써 다음과 같이 반복 계산할 수 있다.³⁾

$$\Delta f_{(n+1)} = \Delta f_{(n)} + \frac{\frac{f_0}{K_L P_L} [P_L - P_G(1+\mu_{(n+1/2)})] - \Delta f_{(n)}}{T' + \frac{1}{2} \Delta t} \cdot \Delta t \quad (4)$$

단 $T' = \frac{2HP_r}{K_L P_L}$ 로서 이것은 계통의 주파수 강하특

성을 1차지연계로 생각하였을 경우의 시정수에 상당하는 것임.

2.2 調速機의 표현

한편 조속기에 대해서는 이제까지는 그림 1 과 같

이 이를 간단한 1차지연계로 표현하여 왔으나^{3),4)} 최근에는 선형응답특성이 보다 우수한 電氣油壓式 조속기가 많이 채용됨에 따라 이 조속기도 보다 정밀하게 표현해서 그 제어효과를 충분히 반영시킬 필요가 있게 되었다. 현재 이들 조속기 모델에 관해서는 여러가지 것들이 제안되고 있으나⁶⁾ 여기서는 그림 2에 보인 바와 같은 표준블록선도 및 표준정수를 사용해서 이들의 운전특성을 고려할 수 있도록 하였다.^{7),8)}

따라서 계통전체의 계산 블록선도는 그림 3처럼 되며 실제 계산은 식 (4)를 기초로 해서 (이때 조속기특성도 修正 Euler 계산식으로 처리함) 반복계산

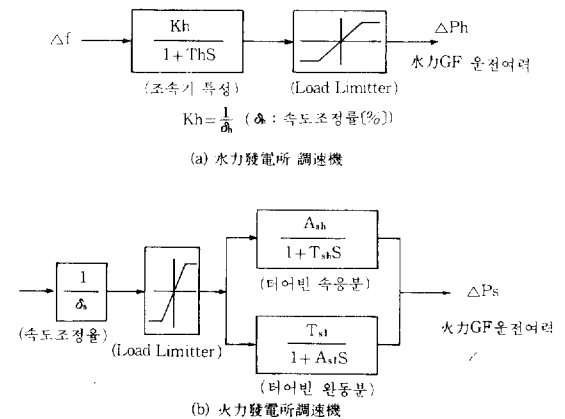


그림 1. 調速機 構成圖

Fig. 1. Block diagram of governor

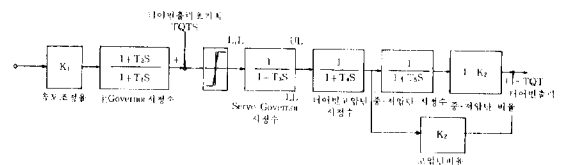


그림 2. 調速機의 標準構成圖

Fig. 2. Standard block diagram of governor

형식 \ 정수	K_1	K_2	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	UL	LL
火力	25	0.3	0.2	0.0	0.2	0.25	9.0	1.03	0.0
水力	20	1.0	0.01	0.0	0.3	0.101	10.0	1.05	0.0

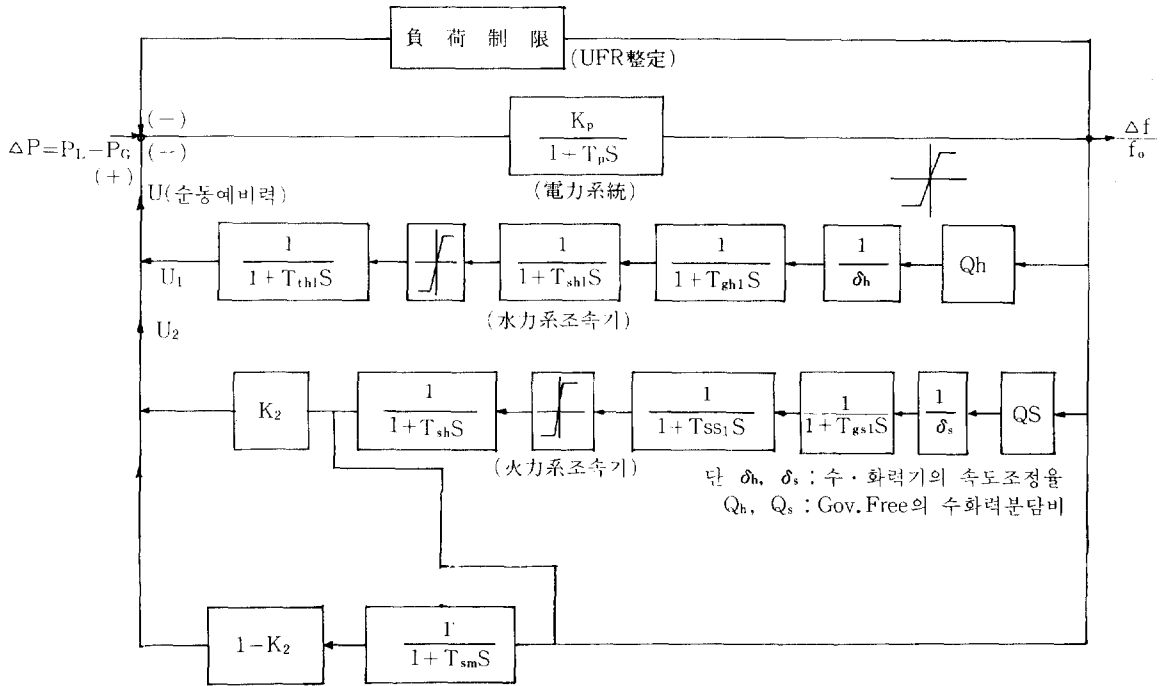


그림 3. 制御系統의 Block 線圖

Fig. 3. Block diagram of control system

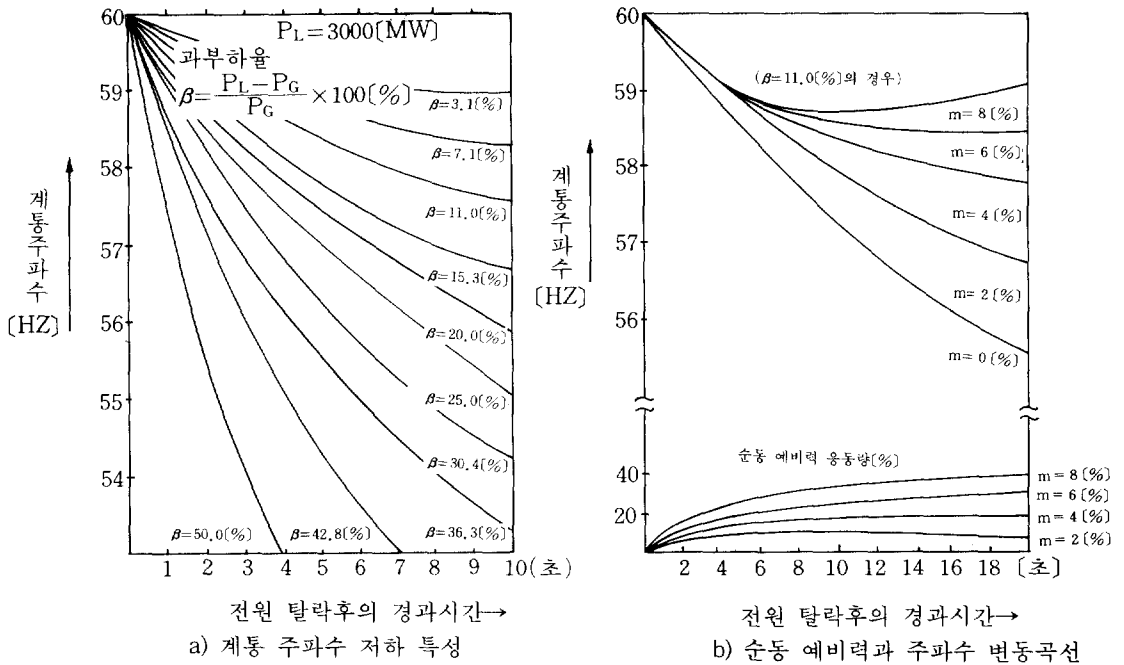


그림 4. 주파수 저하 특성과 회복곡선

Fig. 4. Frequency drop curves and recovery curves

하게 된다. 여기서 Q_h 및 Q_s 는 조속기 free의 水
火力분담비로서 본 연구에서는 $Q_h = 0.1 \sim 0.3$,
 $Q_s = 0.7 \sim 0.9$ 로 가정하였다.

그림 4에 전원탈락시의 주파수저하특성 및 조속기
에 의한 순동예비력의 응답상황을 보였다.(계통용량
3,000 MW, 전원탈락량 100~1,000MW)

이 그림에서도 곧 알 수 있듯이 순동예비력이 증
가함에 따라 주파수의 저하특성은 완화되고 있지만
그래도 전원탈락량이 어느 수준을 넘게 되면 이들
순동예비력의 확보만으로는 계통의 안정운전을 기할
수 없게 되어 전원탈락과 동시에 부하를 강제적으로
차단하는 자동부하제한방식의 채용이 불가피하게 되
고 있다.

3. 최적부하제한 방식의 검토

3.1 소요부하제한량의 결정

전원탈락과 동시에 계통주파수를 일정한 수준(가
령 10초 이내에 59사이클 유지등)으로 회복시키는데
필요한 소요부하차단용량 L'_D [MW] 는 앞서의 식
(1)로부터

$$P_G(1+m) - (P_L - \Delta P_L) = 0 \quad (5)$$

단 $P'_L = P_L - L'_D$

$m =$ 순동예비력의 상한치 [%]

$$(P_L - L'_D) - P_G(1+m) - K_L(P_L - L'_D) \cdot \frac{\Delta f}{f_0} = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} L'_D \left(1 - K_L \frac{\Delta f}{f_0}\right) &= P_L \left(1 - K_L \frac{\Delta f}{f_0}\right) - P_G(1+m) \\ &= P_L - P_G - K_L P_L \frac{\Delta f}{f_0} - m P_G \\ &= \frac{\beta P_L}{1+\beta} - K_L P_L \frac{\Delta f}{f_0} - m \frac{P_L}{1+\beta} \\ L_D &= \frac{L'_D}{P_L} = \frac{\frac{\beta - m}{1+\beta} - K_L \frac{\Delta f}{f_0}}{1 - K_L \frac{\Delta f}{f_0}} \quad \text{[PU]} \quad (7) \end{aligned}$$

단 $\beta = (P_L - P_G) / P_G \times 100$ [%] 전원탈락률
로 구할 수 있다.

그림 5는 이 β 대 L_D 의 관계를 보인 것으로서 이
로부터 쉽게 전원탈락량의 크기에 따른 소요부하
제한량을 결정할 수 있다. 한편 이들 값은 최종주파
수의 회복목표치 및 순동예비력의 보유량 여하에 따
라서도 상당히 그 크기가 변하고 있음을 알 수 있다.

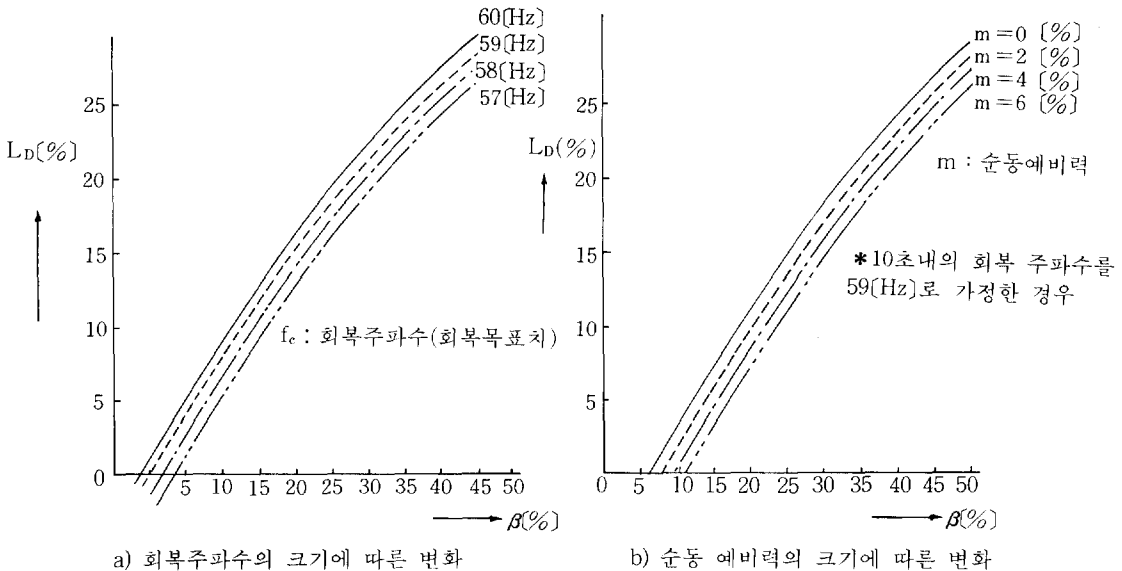


그림 5. 所要 遮断負荷量

Fig. 5. Required load shedding amounts

3.2 부하제한량의 적정배분

자동부하제한은 계통내 각 지점에 설치한 低周波數계전기를 사용해서 부하를 차단하게 된다. 전항에서 전원탈락량의 크기에 따른 소요부하제한량이 결정되었다 하더라도 다음에는 이것을 각 UFR에 어떻게 배분해서 상호협조시킬 것인가가 문제로 된다. 구체적으로는 UFR의 整定을 몇 단계로 나누고 각 단계별로 차단책임량을 차단시켜서 전원탈락시의 주파수저하를 일정한 수준 이상으로 유지함과 동시에 소요차단량의 최소화를 기하게 되는 바 이들 부하차단량의 적정배분이 바로 최적부하제한방식의 열쇠가 되고 있는 것이다.^{9), 10)}

그림 6은 그 일례로서 가령 전원탈락량을 $\beta = 20\%$ 로 잡았을 경우 표 1에 보인 바와 같은 각종 배분방식을 가정해서 UFR에 의한 제어결과를 보인 것이다.

여기서는 UFR에 의한 부하제한을

- 가) 최저주파수가 57.5 사이클 이하에서 2초이상 지속되지 않을 것
- 나) 회복주파수가 15초이내에 59사이클 이상으

표 1. 負荷 制限方式 (UFR 整定値)의 1例
Table 1. Example of load shedding methods

UFR 整定値	UFR 整定(Hz) 瞬時遮斷(0.2 초차단)					Time Delay 要素 遮斷	合計
	58.8	58.5	58.2	58.0	57.5		
負荷遮斷量 (%)	CASE A	5	5	5	5	5	25
	CASE B	3	5	7	7	3	25
	CASE C	3	4	5	6	5	25

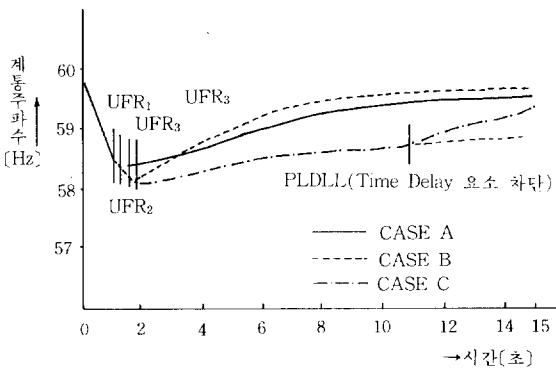


그림 6. 周波數 變動 曲線

Fig. 6. Frequency response curves

로 회복될 것

- 다) 60 사이클 이상에서의 오우버슈팅이 일어나지 않을 것

의 3가지를 제어목적으로 삼고 이때의 부하차단량을 최소화하는 것을 최적부하제한방식이라고 정의하여 검토하였다.

그림 7은 이와 같은 제한방식에 따라 β 의 크기를 5~40%로 변화시켰을 경우의 제어결과를 소요차단량과 제어의 질 (여기서는 회복주파수 및 최저주파수로 대표시켰음)로 대비시켜 보인 것이다.

이에 따르면 예상될 대전원탈락사고 ($\beta = 4 \sim 50\%$ 범위)에 대하여 각 방식 모두가 제어목표를 만족하고 있으나 한편 가정된 방식에 따라서는 60사이클 이상의 오우버 슈팅이 일어나거나 소요차단량면에서 각기 서로 다른 특성을 보이고 있다.

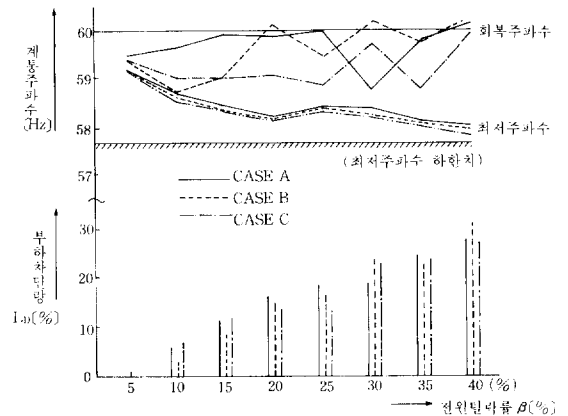


그림 7. 自動 負荷 制限 方式의 比較例

Fig. 7. Comparison of load shedding schemes

3.3 UFR동작시간의 선정

본 연구에서 제안하고 있는 UFR 정정 방법에서는 전원탈락시 주파수의 저하속도 $\frac{df}{dt}$ 를 검출해서 긴급차단하는 $\frac{df}{dt}$ 요소차단 (PLDEM) 과 일정기간

내에 주파수가 설정치 이상으로 회복되지 않을 경우 추가해서 차단하는 시간지연요소차단 (PLDLL)을 포함하고 있지만 그 기본은 5단계로 설정된 UFR 정정에 의한 부하차단에 의존하고 있다.^{3), 5)}

한편 이때 UFR의 형식, 즉 UFR의 동작시간도 주파수저하특성과 부하차단량에 상당한 영향을 미치고 있다는 것이 이번 검토에서 밝혀졌다. 그림 8은 각 단계의 UFR 동작시간을 각각 0.2초 ~ 0.5초 범위로 변화시켰을 때의 제어결과를 보인 것인데 특

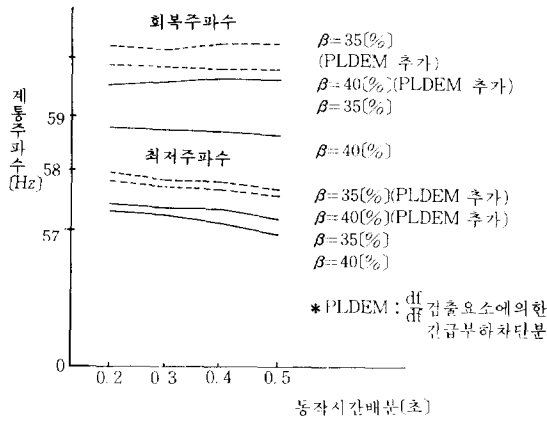


그림 8. 周波数 特性의 比較

Fig. 8. Comparison of system frequency response (time settling)

이 UFR의 동작시간은 최저주파수값에 큰 영향을 미친다는 것을 알 수 있다. 곧, UFR 동작이 순동형으로부터 지연동작형으로 바뀔 때 따라 비록 같은 양의 부하를 차단하면서도(그 결과 회복주파수는 거의 같은 수준으로 유지되지만) 최저주파수가 크게 저하되어 계통의 안정운전을 위협하게 된다.

이런 면에서 각 단의 UFR 동작시간도 최저부하제한방식의 결정에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 시뮬레이션 계산에서는 이 동작시간의 배분도 함께

고려하기로 하였다.

3.4 고장발생확률을 고려한 부하제한 방식의 비교

주지하는 바와 같이 확률변수가 離散分布하고 있을 경우 X 의 함수 $g(x)$ 의 수학적 기대치는

$$E[g(x)] = \sum g(x) \cdot p(x) \quad (8)$$

단 $p(x)$ 는 x 가 발생할 확률로 정의된다.

실계통에서는 과거에 발생한 전원탈락사고의 실적통계로부터 전원탈락사고율 $P(\beta)$ 를 얻을 수 있다. 따라서 이러한 $p(\beta)$ 와 이때의 소요부하차단량 $L_D[MW]$ 를 사용하면 부하제한량에 관한 기대치

$$E = \sum L_D \cdot p(\beta) \quad (9)$$

를 구할 수 있으므로 이것은 각종 부하제한방식의 우열을 비교하는 좋은 척도가 될 수 있는 것이다.¹³⁾

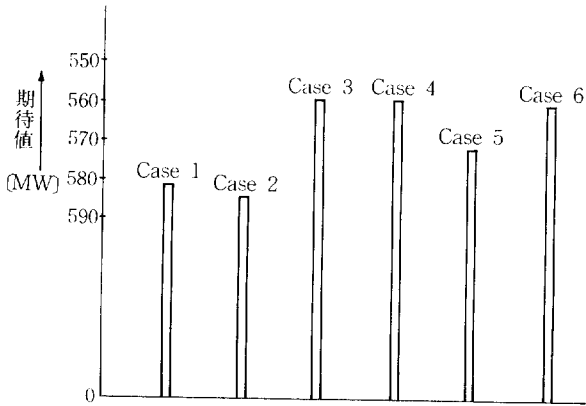
다음 표 2는 이러한 기대치를 사용해서 앞서 그림 7에서 보인 각 방식의 적용결과를 정리한 것이다. 이 결과 $\beta = 5 \sim 40\%$ 의 범위에서는 케이스 C가 기대치 558로서 가장 적은 부하차단량으로 소기의 제어 목적을 달성하고 있다는 것을 쉽게 판정할 수 있다.

마찬가지로 그림 9는 각 단계에서의 UFR 동작시간의 배분에 따른 제어결과를 소요부하차단량의 기대치로 비교해 보인 것이다. ($\beta = 5 \sim 40\%$ 범위) 단, 여기서는 UFR 각 단계에서의 부하차단분담량은 CASE C를 기본으로 하고 각 단계에서의 동작시간만을 여러 가지로 변화시켜서 CASE 1~CASE 6을 선정할 것이다.

표 2. 期待値를 고려한 CASE 별 비교

Table 2. Comparison by expected values

전원탈락률 β (%)	고장발생확률 $P(\beta)$	CASE A		CASE B		CASE C	
		부하차단량 L_D (MW)	기대치 $P(\beta) \cdot L_D$ (MW)	부하차단량 L_D (MW)	기대치 $P(\beta) \cdot L_D$ (MW)	부하차단량 (MW)	기대치 $P(\beta) \cdot L_D$ (MW)
5	0.03	0	0	0	0	0	0
10	0.175	250	43.75	150	26.25	250	43.75
15	0.25	500	125	400	100	450	112.5
20	0.30	750	225	750	225	600	180
25	0.125	900	112.5	800	100	750	93.75
30	0.06	900	54	1150	69	1000	60
35	0.05	1150	57.5	1150	57.5	1100	55
40	0.01	1400	14	1500	15	1300	13
			631.75		592.75		558



동작시간배분 (UFR₁ ~ UFR₅) [초]

- case 1 ... 0.2, 0.2, 0.2, 0.2, 0.2
- case 2 ... 0.2, 0.3, 0.2, 0.2, 0.2
- case 3 ... 0.2, 0.4, 0.2, 0.2, 0.2
- case 4 ... 0.2, 0.5, 0.2, 0.2, 0.2
- case 5 ... 0.2, 0.2, 0.5, 0.2, 0.2
- case 6 ... 0.5, 0.5, 0.5, 0.5, 0.5

그림 9. 動作時間 配分에 따른 期待值

Fig. 9. Expected values on various time settings of UFR

4. 시뮬레이션의 실시 및 검토

이상으로 밝혀진 UFR 정정 (부하차단량배분 및

표 3. 최적부하 제한방식 (UFR 정정치)

Table 3. Optimum load shedding method

UFR 정정 ($\frac{df}{dt} > \alpha$)	UFR 정정치	UFR 整定直					Time Delay 요소 차단
		58.8	58.5	58.2	58.0	57.5	
차단 부하							
부하 차단량 (%)	8.0	3.0	4.0	5.0	6.0	5.0	2.0
동작시간 설정	순시 (0.2 초)	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	58.5 사이 클리어 하 10 초

동작시간의 배분등)을 기초로 총 400여 케이스에 대한 시뮬레이션을 실시한 결과 1차적으로 표 3 과 같은 부하제한방식이 제어의 질과 소요부하차단량 (기대치) 최소라는 면에서 가장 효과적이라는 것을 밝힐 수 있었다.

실계통에의 적용에로서는 표 4 및 그림 10에 $\beta=9.1 \sim 41.2\%$ 및 5.26~42.3% 범위에 대한 계산결과를 보였다.

그림 10에서도 곧 알 수 있드시 적절한 부하제한방식의 채용으로 예상될 수 있는 각종 대전원탈락사고에서도 충분히 계통의 안정운전을 기할 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 참고로 현재한전에서든 여기서 제안된 부하제한방식에 맞추어 UFR 정정을 재검토중에 있으며 실계통의 각종 정수의 파악에 착수하고 있다.

표 4. 最適負荷制限方式의 計算結果

Table 4. Results of the optimum load shedding

負荷水準 (MW)	電源脫落容量 (%)	$\frac{df}{dt}$ 要素에 의한 負荷遮断 8%	UFR 整定에 의한 負荷遮断					Time Delay 要素遮断 58.8 Hz 이하 10秒 持續	全負荷遮断量 (MW)	F _{min} 最低值 (Hz)	F _{final} 回復值 (Hz)
			58.8	58.5	58.2	58.0	57.5				
			3%	4%	5%	6%	5%				
2400	9.1		72					72	58.737	59.071	
"	14.3		72	96			48	216	58.405	59.283	
"	20		72	96	120			288	58.119	59.086	
"	26.3	192	72	96			48	408	58.316	59.000	
"	33.3	192	72	96	120			528	58.055	59.252	
"	41.2	192	72	96	120	144		624	57.825	59.528	
5000	5.26							0	59.101	59.322	
"	11.1		150	200				350	58.488	59.878	
"	17.6		150	200	250			600	58.170	59.889	
"	25	400	150	200			100	850	58.348	59.398	
"	33.3	400	150	200	250		100	1100	58.055	59.252	
"	42.3	400	150	200	250	300		1300	57.764	59.015	

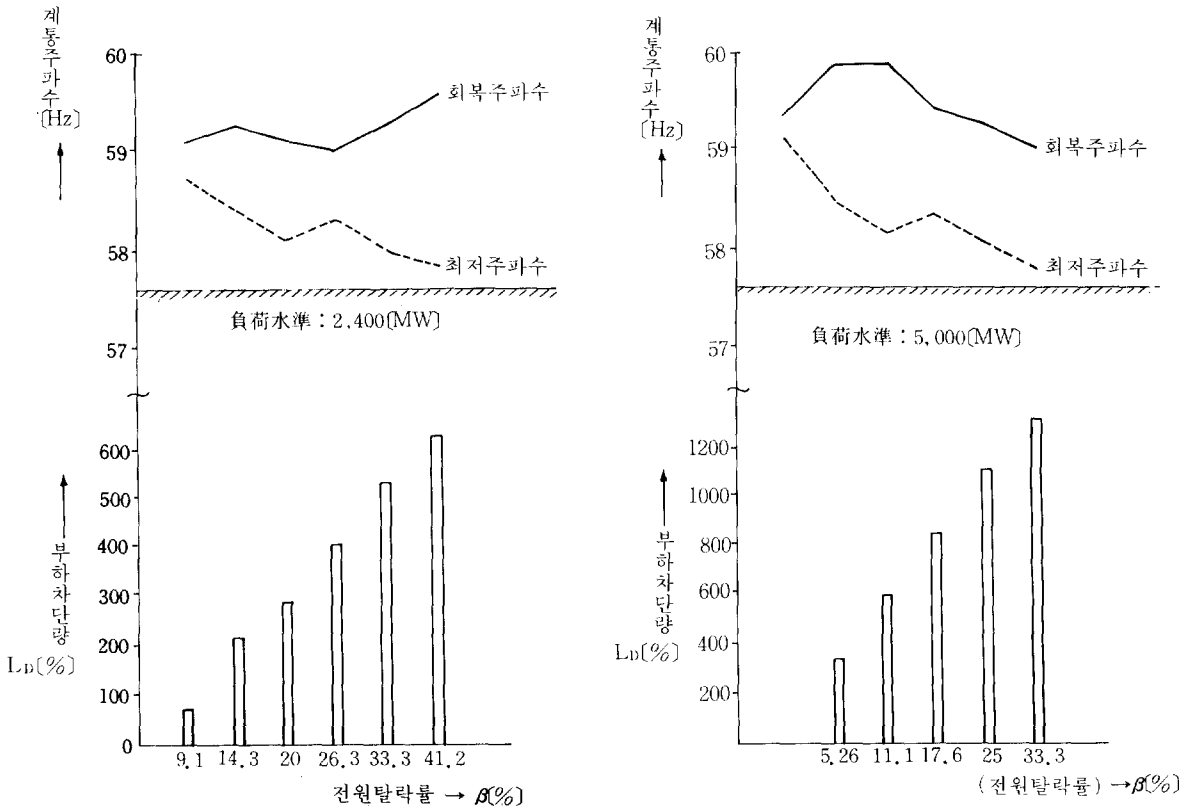


그림 10. 最適負荷制限方式의 計算結果

Fig. 10. Results of the optimum load shedding method

5. 結 論

이상으로 대전원탈락사고시 계동주파수를 신속하게 적정수준까지 회복시키는 자동부하제한방식에 관하여 조속기 모델의 정밀한 취급과 순동예비력의 성장적인 파악을 토대로 소요부하차단량을 정확하게 산정하고 이를 각 단의 UFR 에 적정배분시키므로써 현재 운용중인 자동부하제한방식을 보다 계통의 실정에 맞게 개선할 수 있다는 것을 보였다.

또한 본 연구에서는 계통의 운용실적에서 일어난 고장발생 (전원탈락) 확률까지 고려한 소요부하차단량에 관한 기대치를 도입하므로써 이른바 최적부하제한방식의 수립을 계수적으로 유도할 수 있었다.

한편 최근의 추세는 UFR에 의한 단순한 부하제한보다는 보다 종합적인 계통보호방식으로서 마이크로프로세서를 사용한 계통안정화장치의 설치운용을 지향하고 있어서 앞으로는 이에 관한 연구가 크게 요망되고 있다.

끝으로 본 연구를 수행하는데 있어서 귀중한 기술자료를 제공해 준 한전의 조병문 차장 및 시발래

이훈 처리에 진력해 준 대학원의 김영태, 도종균 양 군에게 깊이 감사하는 바이다.

參考文獻

- 1) 宋吉永外: "大電源脫落事故時의 系統動揺特性解析" 大韓電氣學會誌 vol. 24, No. 2 1975.
- 2) D. W. Smaha 外: "Coordination of load conservation with turbine-generator underfrequency protection" IEEE vol. PAS 99 No. 3. 1980.
- 3) 宋吉永外: "最適負荷制限方式의 적용에 관한 연구" 大韓電氣學會誌 vol. 24, No. 2, 1975.
- 4) 宋吉永: "瞬動예비력을 고려한 系統의 最適運用方式에 관한 연구" 大韓電氣學會誌 vol. 24, No. 5, 1975.
- 5) 宋吉永: "運轉예비력의 最適運用方式에 관한 연구" 大韓電氣學會誌 vol. 28, No. 5, 1979
- 6) 關根泰次著: "電力系統過渡解析論" 日本OHM

- 社, 1984.
- 7) Japanese Committee : "Stability of power system and simulations in Japan" simposium June 1981.
- 8) 日本電力中央研究所 : " 發電系와 制御系의 모델링 " 電研電力技術研修資料, 1983.
- 9) H. E. Lokay, Burtney K : "Application of underfrequency relays for automatic load shedding" IEEE vol. PAS 87, No. 3. 1968 .
- 10) IEEE Committee report : "Survey of underfrequency relay tripping of load under emergency conditions" IEEE vol. PAS 87, No. 3, 1968
- 11) R. C. Durbeck : " Simulation of five load shedding schedules " IEEE vol. PAS 89, No. 5, 1970.
- 12) D. K. Subramanian : "Optimum load shedding through programming techniques" IEEE vol. PAS 90, No. 1, 1971.
- 13) 宋吉永外 : " 대전원 탈락사고시의 주파수 특성 개선에 관한 연구 " 대한전기학회 1984년 하계 학술회의 논문집, 1984.