

運轉豫備力の最適運用方式에 관한 研究

論 文
28-5-3

A Study on the Optimum Operation Scheme with Operating Reserve Power.

宋 吉 永
(Kil Yeong Song)

Abstract

During severe emergencies which result in insufficient generation to meet load, an automatic load shedding method considering the spinning and operating reserve can establish the optimum system operation.

This paper presents methods and results of a study on the optimum operating scheme with spinning and operating reserve power in case of outage of large generator units to prevent frequency decay and continue stable operation.

This study covers following three parts

- 1) Analysis of spinning reserve characteristics
- 2) Determination of operating reserve requirements
- 3) Development of the optimum load shedding programs

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

1. 序 論

本研究는 전력계통의 중대사고시에 있어서 系統周波數의 異常低下를 방지하고 계통의 安定運轉을 계속하기 위해서 必要될 瞬動 및 運轉豫備力の 質과 量을 검토함과 동시에 이들의 적절한 運用을 위한 計算 알고리즘의 開發과 이를 통한 계통의 最適運用方式을 강구하기 위하여 수행된 것이다. 일반적으로 系統容量에 비해서 15~30%에 이르는 大電源이 갑자기 계통으로부터 脫落될 경우 系統周波數가 劇적으로 저하하고 이것이 원인이 되어 發電機의 脫落이 연쇄적으로 일어나면서 드디어는 全系統崩壞에 이르게 될 우려가 적지 않다.^{1,2)}

이러한 경우에 있어서의 系統動搖特性改善과 이에 대비한 계통保護對策, 으로서 강제적으로 負荷를 일부 차단하는 自動負荷制限方式의 채용이 유효하다고 것이 밝혀져 있다.^{1,2,4,6)} 한편 그렇다고 事故 때마다 일하게 負荷遮斷에만 의존한다는 것은 실제의 系統運用面이나 수용가에 대한 서비스低下라는 면에서 충분히 검토되어야 할 문제이다.^{3,4)}

本文에서는 이러한 문제점들을 감안하여 계통의 安定運轉을 계속하기 위해서 必要될 運轉豫備力必要量의 산정과 이에 最適運用方式에 중점을 두고 수행한 研究結果를 要約整理하고 있다.

2. 運轉豫備力の 構成

運轉豫備力の 定義는 負荷의 변동 및 사고가 발생했을 때에도 규정된 周波數를 유지하고 安定된 공급

* 正會員: 高麗大 工大 教授·工博
接受日字: 1979年 3月 24日

실시하기 위하여 短時間내에 운전가능하며 또한 運轉停止중인 豫備設備가 가동해서 부하를 담당하게 될때 까지 계속해서 發電할 수있는 능력을 갖는 供給力이라고 한다.”

이것은 주로 기후급변등에 의한 수요의 급증이나 電源의 일시적(단시간)인 정지 또는 出力억제에 대비하는 것으로서 그 구체적인 구성은 운전중인 발전기의 餘力 및 정지, 대기중인 供給設備중 10분정도 이내에 運轉 가능한 水力과 가스터빈 등으로 이루어진다.

한편 이 運轉豫備力 중에는 電源脫落事故와 같은 긴급사태가 발생해서 계통주파수가 이상저하될 경우 즉시 應動을 개시해서 이에 대비할 수 있는 瞬動豫備力도 포함된다. 곧 大電源脫落時의 주파수변화 및 運轉豫備力の 應動狀況은 그림 1에 보인 바와 같다.

運轉豫備力を 구성하는 各要素는 각각의 特性差에 따라서 분담하게 될 領域도 서로 다르기 때문에 가령 運轉豫備力の 總量이 충족되고 있다고 하더라도 그것만으로 소정의 信賴度를 확보할 수는 없는 것이며 특히 사고직후에 재빨리 應動을 필요로하는 瞬動豫備力에 의존하는 바가 크다고 하겠다.

그러므로 瞬動豫備力으로서의 기능을 갖는 예비력도 계속 능력이 허용한다면 運轉豫備力으로서의 條件을 만족하게 된다. 또한 運轉豫備力の 발동에 의해서 周波數가 일정수준이상으로 회복하면 調速機 free運轉(이하GF 運轉이라 부름)은 자동적으로 出力이 본래상태로 되돌아가서 다시 瞬動豫備力으로 保有하게 되는

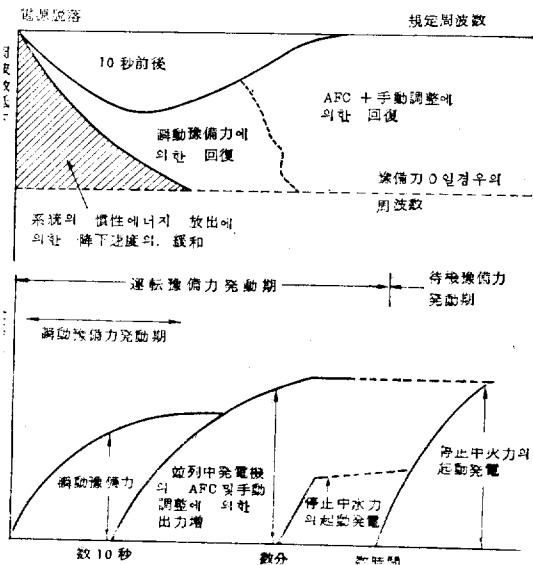


그림 1. 大電源脫落時의 周波數 및 豫備力の 應動狀況
Fig. 1. Response curves of frequency and reserve power.

것이다.

3. 運轉豫備力の 應動特性分析

3.1. 計算條件

앞에서 본바와같이 運轉豫備力은 GF運轉에 의한 瞬動應動餘力を 중심으로 AFC運轉餘力 및 手動應動이 가능한 水火力一部 그리고 起動이 빠른 水力과 가스터빈, 디젤出力 등으로 구성되고 있다. 이러한 諸要素外에 電源脫落時 주파수의 異常低下억제에 효과가 큰 負荷遮斷特性까지 여기에 포함시켜서 생각한다면 이들의 特性分析을 위한 制御系統으로서의 우선 그림 2와 같은 것을 생각할 수 있다.”

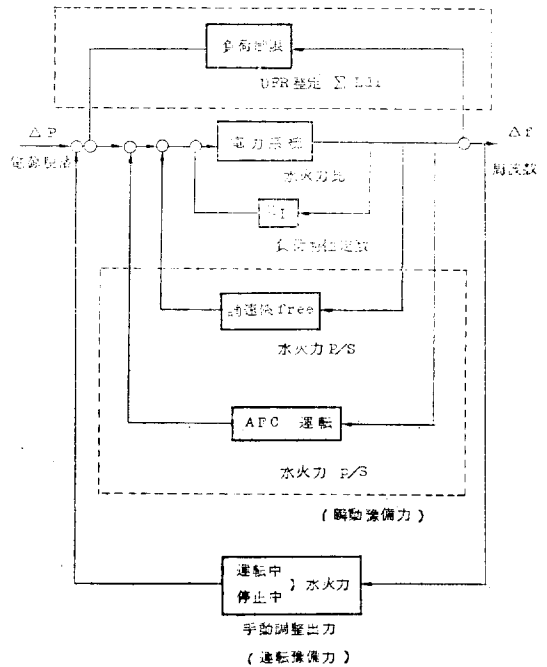


그림 2. 制御系統의 概念圖
Fig. 2. Outline of control system

이들의 計算條件까지 檢討項目으로서의 개개의 制御特性 곧 負荷特性, GF運轉特性, AFC制御特性, 負荷遮斷特性 등으로 나누어서 살펴볼 수 있으며 다시 이들을 瞬動豫備力이라는 機能面에서 종합적으로 다루어 볼수 있다. 그림 3은 이 系統의 구체적인 Block線圖이며 실제의 計算에서는 digital計算機를 사용해서 修正 Euler法을 土臺로 0~20秒間의 各構成要素別 및 종합적인 周波數-時間特性을 解析하였다.

3.2. 計算結果

먼저 그림 4는(GF+AFC) 動作에 의한 制御結果를 瞬動豫備力の 保有量m(%)을 파라미터로 해서 보인 것이다.

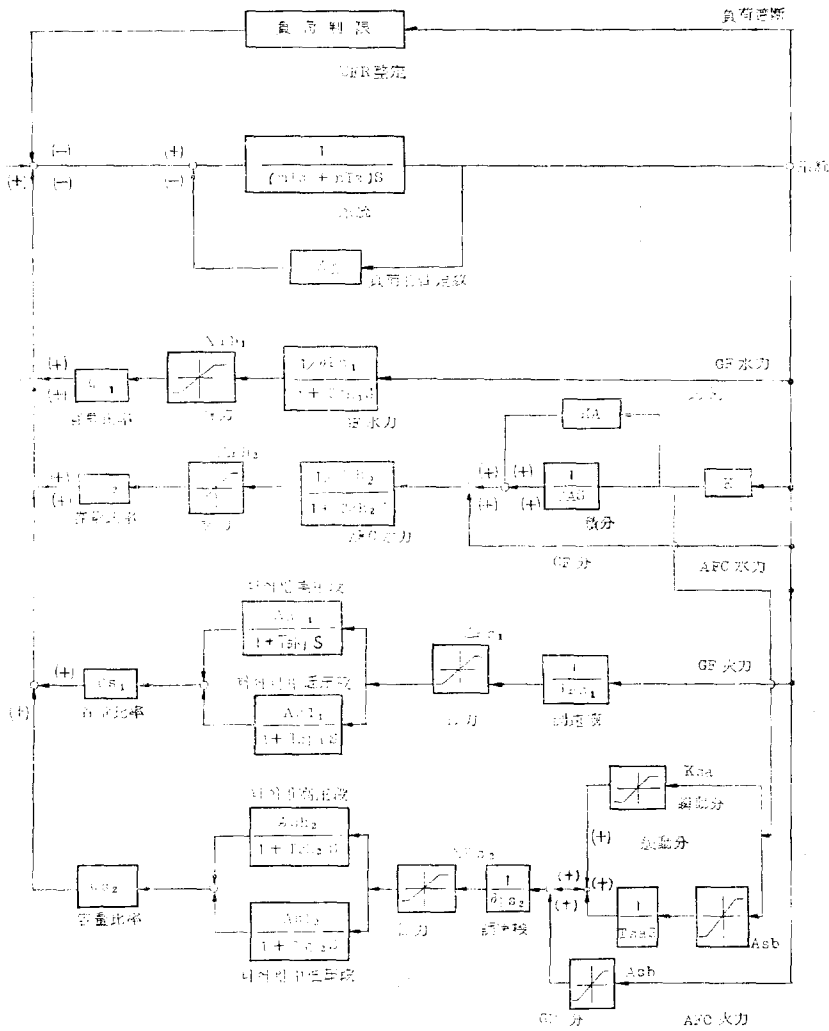


그림 3. 制御系統의 Block線圖
Fig. 3. Block diagram of control system

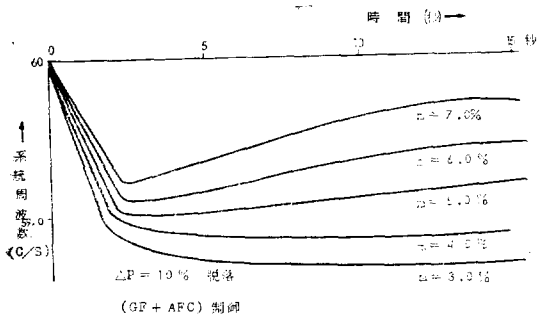


그림 4. (GF+AFC)에 의한 周波數改善效果
Fig.4 Frequency recovery curves by (GF+AFC) operation

그림 5(a)는 이때의 出力應動狀況을 그리고 동그림 (b)는 各要素別의 出力應動狀況을 보인 것이다.

또 그림 6은 참고로 m의 값이 같더라도 이것을 GF 運轉단독의 의존할 경우와 (GF+AFC) 運轉으로 分擔시켜서 다룰때의 制御效果를 비교한 것이다.

이들의 計算結果로부터 곧 알수 있듯이 事故直時 應動이 빠른 瞬動豫備力の 保有量여하가 계통주파수의 異常低下역직에 크게 기여하고 있으며 또한 가능한한 이것들을 각지의 GF 및 AFC 制御裝置에 分擔시켜서 運用하는 것이 보다 효과적이라고 말할수 있다.

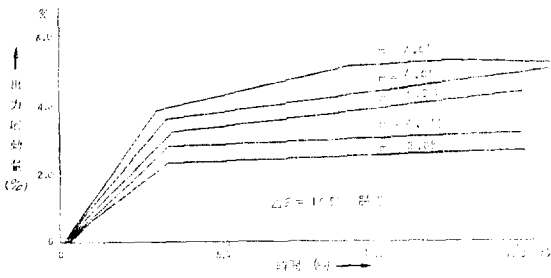


그림 5. (a) (GF+AFC)의 出力應動特性
 Fig. 5. (a) Response curves of Spinning reserve(GF+AFC)

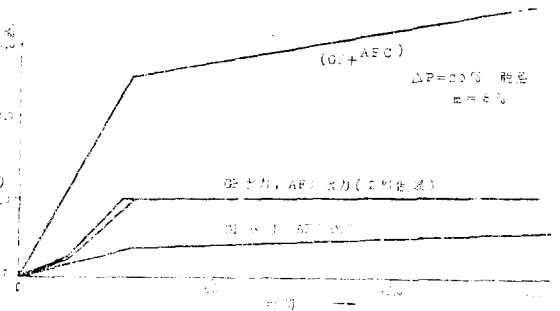


그림 5. (b) 各 要素別의 出力應動狀況
 Fig. 5. (b) Response curves of spinning reserve(each control elements)

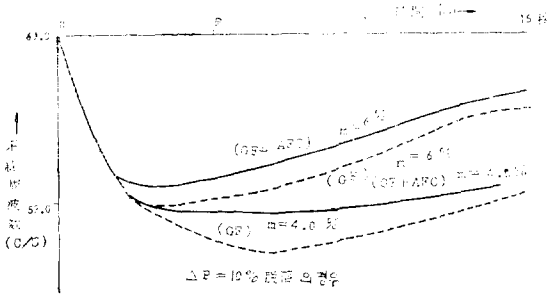


그림 6. (GF+AFC)와 GF 制御의 比較
 Fig. 6. Comparison of GF and (GF+AFC) control

4. 最適負荷制限方式의 再檢討

금번 運轉豫備力の 검토를 계기로

- 1) 앞으로 예상될 電力需要對 過負荷率과의 추이
- 2) df/dt 要素檢出에 따른 緊急負荷遮斷실시상의 문제점

등을 새로히 감안해서 이번에 表 1에 보인바와 같은 低周波數繼電器(이하 UFR라고 부름) 整定條件을결정해서 適用하는 것이 좋을 것이라는 결론을 얻었다⁸⁻¹⁰⁾

그림 7은 本方式으로 1983年末 韓電系統을 대상으로 電源脫落量(過負荷率)을 10~40% 범위까지 가정하였을 때의 周波數改善效果의 1例를 보인 것이다.

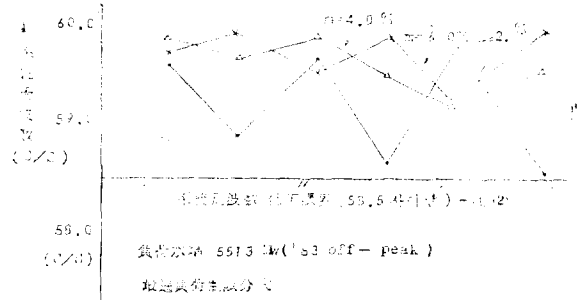


그림 7. 瞬時豫備力에 따른 周波數改善效果
 Fig. 7. Frequency recovery curves with spinning reserve operation(m : parameter)

表 1. 最適負荷制限方式案(UFR整定值)
 Table 1. Optimum load shedding program(UFR settings)

UFR 整定值 (c/s)		59.0	58.5	58.0	57.5	合計(%)
負荷遮斷量 Ld^i	瞬時遮斷分(%)	5.0	7.0	8.0	7.0	27.0
	Time Relay要素(%)	3.0*	—	—	—	3.0
合計		8.0	7.0	8.0	7.0	30.0

* 59.0사이클 이하에서 10秒이상 머물때 遮斷

이에 의하면 瞬動豫備力(m)이 2% 정도 확보된다면 계통주파수를 58.5사이클 수준 이상으로 유지하는데 아무 문제가 없을 것이며 가령 m가 4% 이상 확보된다면 주파수低下限도를 59.0사이클 수준이상으로 충분히 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 運轉豫備力必要量算定

5.1. 計算條件

運轉豫備力の 必要量を 算定함에 있어서는 주파수의 回復단계를 그림 8처럼 時間적으로 구분해서 求하는 것으로 하였다.^{7,10)}

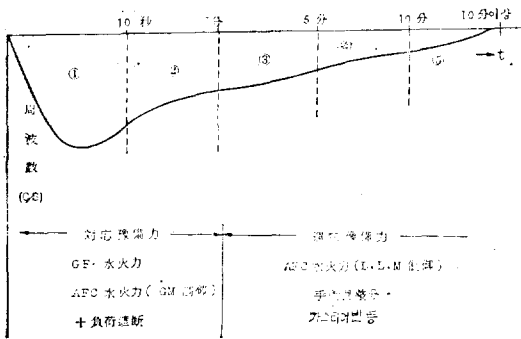


그림 8. 時間區分別 豫備力機能

Fig. 8. Function of reserve power depending on time duration.

따라서 運轉豫備力 必要量を 산정할때의 기본원칙으로서는 重大事故時에 계통주파수를 火力運轉耐力, 系統分離條件, 서어비스등을 고려한 時間區分別의 주파

수低下限도를 表 2의 값에 유지하고 負荷制限을 최소한으로 억제하기 위한 所要豫備力量을 다음 計算式을 써서 求하도록 하였다.

$$\Delta f = \frac{P_L - (1+m)P_G}{K_L P_L} \times f_s$$

但 m : 瞬動豫備력을 포함한 運轉豫備力の 크기 (%)

K_L : 負荷特性定數 (%MW/사이클)

f_s : 基準周波數 (60 C/S)

P_G, P_L : 發電機出力 및 負荷 (MW)

事故規模는 우리나라에서의 長期電源開發計劃 및 各時點에서의 單一發電所電源容量을 감안해서 表 3에 보인바와 같이 系統容量對比 過負荷率 (%)로서 18.2~44.6% 범위까지를 대상으로 하였다.

5.2. 計算結果

計算結果의 1例로서 表 4에 1983年末 重負荷時點에 있어서의 瞬動豫備力 및 負荷制限을 파라미터로 해서 求한 時間區分別 運轉豫備力必要량을 보인다.

가) 周波數改善效果

電源脫落規模(過負荷率 %)가 10~20% 범위에서는 瞬動豫備力이 4% 정도만 확보된다면 UFR 整定에 의한 第1段負荷制限($\Delta Ldi=5.0\%$ 상당)만으로 계통주파수를 58.5 사이클水準이상으로 유지할 수 있게 된다

나) 時間區分別 運轉豫備力 必要量

앞서 表 4에서 본바와같이 UFR의 1段 및 2段的 負荷制限實施로 대부분의 경우 1차적으로 계통주파수는 最低運轉限界值인 58.5 사이클 이상으로 유지되지만 계속해서 運轉豫備力이 發動되지 않으면 59.0 사이클 이

表 2. 時間區分別 周波數低下限度

Table 2. Lower limits of frequency VS time duration

時間區分	①	②	③	④	⑤
	0~10秒	10秒~1分	1分~5分	5分~10分	10分以上
周波數(C/S)	58.5	58.5	59.0	59.5	60.0

表 3. 最大電源脫落量(送電端)

Table 3. Maximum outage capacity(generator side)

計 算 時 點	系統容量(MW)	電 源 脫 落 量			
		(MW)	系統容量對比(%)	過負荷率(%)	
1981年	最大負荷	7805	1200	15.4	18.2
	深夜負荷	4293	1200	28.0	38.8
1983年	最大負荷	10023	1700	17.0	20.4
	深夜負荷	5513	1700	30.8	44.6

*深夜負荷는 最大負荷의 55%로 가정하였음.

表 4. 時間區分別 運轉豫備力必要量 計算結果(1983年末 最大負荷)

Table 4. Results of operating reserve requirement(1983 Peak load case)

負荷水準 (MW)	負荷制限量 ΣLdi (%)	電源脫落量 (過負荷率%)	瞬動에 비력 保有量(%)	① 0~10초	② 10초~1分	③ 1分~5分	④ 5分~10分	⑤ 10分以上
				58.5%	58.5%	59.0%	59.5%	60%
1002.3 (最大 負荷) 1983年末	0	13.6	2	1.0	1.0	3.0	5.0	8.0
			4	0	0	0	1.0	4.0
			6	0	0	0	0	0
		16.2	2	3.0	3.0	6.0	8.0	10.0
			4	0	0	2.0	4.0	6.0
			6	0	0	0	0	2.0
	20.4	2	10.0	10.0	12.0	14.0	16.0	
		4	6.0	6.0	8.0	10.0	12.0	
		6	2.0	2.0	4.0	6.0	8.0	
	5.0	13.6	2	0	0	0	2.0	4.0
			4	0	0	0	0	0
			6	0	0	0	0	0
16.2		2	0	0	3.0	5.0	7.0	
		4	0	0	0	1.0	3.0	
		6	0	0	0	0	0	
20.4	2	4.0	4.0	6.0	9.0	11.0		
	4	0	0	2.0	5.0	7.0		
	6	0	0	0	1.0	3.0		
12.0	20.4	2	0	0	0	0	2.0	
		4	0	0	0	0	0	
		6	0	0	0	0	0	

상으로 회복되지 않는 경우가 생기게 된다. 여기서는 시간區分 ③④⑤에서의 주파수 維持目標值를 각각 59.0 59.5, 60.0 사이를 이상으로 잡았는데 이때의 運轉豫備力必要量은 1.0~16.0% 범위로 까지 증대되어 나가고 있다. 보다 苛酷한 事故例(주로 深夜負荷時의 電源脫落)를 대상으로 해서 얻은 計算結果에 의하면 瞬動豫備力保有量을 4.0%, UFR整定에 의한 第2段負荷制限($\Sigma Ldi=12\%$ 상당) 實施의 경우 電源脫落規模가 20~30% 범위로 커지면 7.0% 정도의 運轉豫備力이 所 要되고 있다.

그림 9는 그 1例로서 時間區分 ⑤에서 계통주파수를 60.0 사이를 水準이상으로 回復시키는데 所 需될 運轉豫備力必要量을 정리해서 보인 것이다.

이상의 검토결과 앞으로 예상될 10~20% 범위의 電源脫落事故에 대하여서는 4% 정도의 瞬動豫備力만 확보된다면 運轉豫備力의 變動없이도 UFR에 의한 自動負荷制限實施로 계통주파수를 基準值까지 回復시킬 수 있을 것이다. 한편 電源脫落規模가 20~30% 범위까지

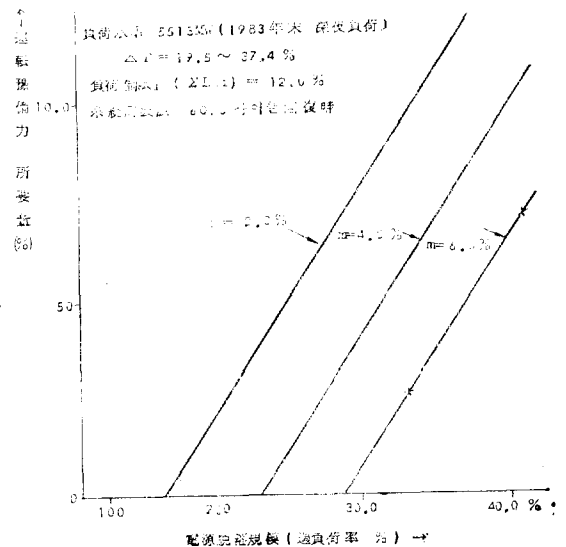


그림 9. 電源脫落規模와 運轉豫備力 所 要量
Fig. 9. Outage capacity size vs operating reserve requirements

확대되더라도 7.0% 정도의 運轉豫備력이 확보된다면 最小限의 負荷制限으로도 계통주파수를 기준치 이상으로 유지해서 安定運轉을 지속할 수 있게 될 것으로 기대된다. 한편 이들 運轉豫備力の 구성은 AFC水火力(L.L.M制御), 手動調整分外에 가스터빈, 직렬發電機의 起動이 되겠는데 특히 우리나라에서는 후자의 早期起動이 이 소요량을 커버하는데 유효할 것이다.

6. 結 論

이상으로 大電源脫落事故時 계통주파수를 基準値까지 回復시켜서 火力發電機의 連續運轉을 가능케하기 위한 運轉豫備力 必要量을 最適負荷制限方式과의 關係에서 구체적으로 검토한 결과 다음과 같은 몇가지 結論을 얻을수 있었다.

1) 最適負荷制限方式

이제까지 주로 瞬動豫備力만을 고려해서 실시해온 UFR整定을 運轉豫備力까지 고려해서 보다 합리적으로 결정할 수 있는 실질적인 方案을 제시할 수 있었고 다시 여기에서 결정된 負荷遮斷必要量을 각지점에 배치된 UFR間에서 適正配分할 수 있는 協調方案을 수립하였다.

2) 瞬動豫備力の 保有目標値決定

負荷特性, GF運轉特性 및 AFC 制御特性 등을 포함시켜서 瞬動豫備力の 應動特性을 구체적으로 검토한 결과 當分間 우리나라에서의 瞬動豫備力の 保有目標値로서는 大約 3~4% 정도만 확보된다면 충분할 것임을 밝힐수 있었다.

3) 運轉豫備力必要量決定

電源脫落時 數分이내에 계통주파수를 基準値에 회복시키는데 소요될 運轉豫備力必要量을 算定한 결과 上記 瞬動豫備力이 4.0% 정도가 확보된다고 가정할 때 20~30% 범위의 電源脫落事故에 대처해서 최소한 7.0% 정도의 運轉豫備力이 확보된다면 實系統運用面에서 별 문제가 없을 것으로 판단되었다.

끝으로 本研究를 수행하는데 있어 귀중한 資料提供

및 유익한 助言을 많이 주신 韓電系統運用部 黃濯次長 및 尹甲求課長에게 심심으로 感謝를 드리는 바이다.

參 考 文 獻

- (1) H.E. Lokay, Burtnyk, "Application of Under Frequency Relays for Automatic Load Shedding" IEEE vol. 87 No. 3 pp. 776~783 March 1968.
- (2) L.P. Hajuda, J. Peschon, W.F. Tinney, D.S. Piercy, "Optimum Load Shedding Policy for power Systems" IEEE vol. PAS-87 pp. 784~795, March, 1968.
- (3) IEEE Ccmmittee Report "Survey of Under Frequency Relay Tripping of Load under Emergency Conditions" IEEE vol. PAS-87 pp. 1362~1365 May, 1968.
- (4) D.K. Subramanian "Optimum Load Shedding Through Programming Techniques" IEEE vol. PAS-90 pp. 89~95. 1971.
- (5) D.R. Davidson 外: "Long term Dynamic Response of Power Systems—An Analysis of Major Disturbance" IEEE Trans. PAS-94 pp. 819~826, 1975.
- (6) M.S. Baldwin 外: "Determination of Frequency Decay Rates during Periods of Generation Deficiency" IEEE Trans. PAS-95 pp. 26~36, 1976
- (7) "瞬動豫備力에 관한 檢討結果報告書" 日本中央電力協議會 連系運用小委員會 1967. 9
- (8) 宋吉永: "最適負荷制限方式의 채용에 관한 研究" 大韓電氣學會誌 vol. 24, No.2 1975.
- (9) 宋吉永: "瞬動豫備力을 고려한 系統의 最適運用方式에 관한 研究" 大韓電氣學會誌 vol. 24, No. 5 1975.
- (10) 宋吉永: "運轉豫備力計算프로그램開發" 韓電技術 研究報告書 1979. 2.