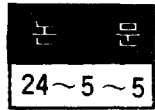


瞬動豫備力을 고려한 系統의 最適運用方式에 관한 研究



Study on the Optimum System Operation by Considering the Spinning Reserve Power

宋 吉 永*
(Kil Yeong Song)

Abstract

This paper describes the result of a Study for the Optimum Operating method with Spinning reserve in case of outage of large generator unit to improve the system stability and prevent the system frequency drop.

This is usually done by governor free operation, so we focused our attention to the operating Characteristics of spinning reserve.

Next, a study was made to measure the upper limit of Spinning reserve and when this upper limit cannot match the required power, a relationship between the amount of spinning reserve and that of the load shedding requirement was searched with regard to several system operating conditions to use it in our future system operation.

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

1. 序 論

앞서 系統容量의 15~25%에 이르는 大電源이 사고를 일으켜 갑자기 系統으로부터 脫落되었을 경우에 있어서의 系統動搖特性과 이에 대비한 系統保護對策, 그중에서도 특히 강제적으로 負荷를 일부 차단하는 自動負荷制限方式의 채용이 유효하다는 것을 밝힌 바 있다⁽¹⁾⁽²⁾

앞으로도 계속해서 新銳火力 및 原子力發電所등의 大單位容量電源의 개발이 추진됨에 따라 직면하게 될 大電源脫落事故(그밖에 系統分離에 의한 供給力의 不足도 포함됨)에 의한 系統周波數의 異常低下에 대한 대책으로서의 위에 든 自動負荷制限方式의 채용뿐만 아니라 系統의 連系에 의한 系統規模의 증대, 電源集中의 제한, 적정한 系統分離의 실시등도 병행해서 채용되어야 하겠지만 그밖에 常時 이러한 不時的 系統事故에 대비해서 瞬動예비력을 어떻게 保有하고 있어야 하는가 하는 것이 큰 문제로 될 것이다.

일반적으로 系統의 예비력은 電源事故, 예상외의 渇水라던가 需要增加등 예기치않는 供給力부족에 대처하

기 위해서 설치되는 것인데 여기서 특히 瞬動豫備力이라고 하는 것은 大電源脫落事故에 있어서 사고발생직후부터 주로 發電機의 調速機가 동작을 개시해서 10초정도로 出力應動制限值(Load Limiter)까지의 運轉餘力을 대부분 發動하여 周波數低下를 완화시키는데 기여하는 機能을 갖는 예비력이라고 定義되는 것이다.

本文에서는 상술한 調速機 Free運轉(GF)에 의한 餘力을 충분히 활용해서 이러한 系統事故에 대비할 수 있는 瞬動예비력의 適正保有문제 및 이를 고려한 系統사고시의 最適運用方式을 강구하고자 검토한 내용을 요약정리하였다.

2. 瞬動豫備力의 機能과 構成

事故에 의한 發電力의 突發的脫落時에 있어서는 무엇보다도 급격하게 떨어지는 系統周波數의 低下를 억제하는데 유효한 應動이 빠른 예비력의 발동이 중요한데 本節에서는 瞬動예비력검토의 제 1단계로서 電源脫落時에 應動하는 각종 供給設備의 機能 및 이에따른 周波數의 回復과정을 시간적으로 구분해서 살펴보기로 한다. 그림 1은 이러한 事故時의 周波數 變動상황과 예비력應動상황의 개념을 보인 것이다.

*正會員: 瀋陽工大教授(工博) 當學會理事
接受日字: 75年 8月 11日

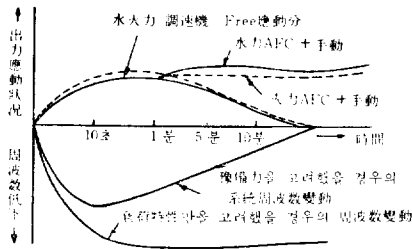


그림 1. 瞬動特性만을 고려했을 경우의 周波數變動
 Fig. 1. Outline of the function of spinning reserve power.

앞서 瞬動에비력의 定義에서 본 바와 같이 이것은 電源脫落으로 周波數가 거의 最低로 떨어지는 時間帶, 곧 그림에서의 ①에 해당하는 10초정도의 구간내에서 그가 가진 出力의 대부분을 즉시 發動할 수 있어야 하는 것으로 우선 即時性 및 確實性이라는 관점에서 自動發電이 가능해야 할 것이다. 또한 系統周波數의 安定을 유지하기 위하여 周波數低下가 계속하는 한 적어도 瞬動에비력外的 運轉에비력(이것은 보통 運轉중인 發電機의 餘力 및 정지중인 供給設備中 10분정도 이내에서 운전가능한 火力, 가스터빈등으로 구성된다)이 發動될 때까지 계속해서 出力을 낼 수 있어야 한다는 機能을 지녀야 하는 것이다.

이상의 조건을 만족하는 瞬動에비력은 調速機 Free (GF) 運轉을 하고있는 發電機(AFC의 대상發電機도 포함됨)의 調速機餘力 및 AFC發電機의 AFC信號에 의한 即時應動分으로 구성된다고 하겠다.

이밖에도 이러한 系統사고의 初期단계에서 周波數유지에 공헌하는 要素로서는 周波數低下 또는 電壓低下에 기인하는 需要減少효과에 의한 負荷特性이라던가 周波數低下과정에서 過渡적으로 放出되는 發電機慣性에너지 같은 것도 고려되겠지만 이들은 供給力이 아니기 때문에 本 檢討에서는 제외하기로 하였다.

한편 우리나라 系統에서의 그동안의 運轉実績 및 앞으로의 전망에 있어서도 당분간 AFC에 의한 瞬動에비력의 保有는 기대하기 어려운 실정에 있으므로 本文에서는 이것 역시 제외해서 결국 瞬動에비력은 水力 및 火力發電所에서의 調速機 Free運轉하고 있는 발전기의 運轉餘力만으로 구성된다고 가정하고 이들의 基礎特性 解析 및 이것을 중심으로 한 適正運用문제에 초점을 맞추어 검토하기로 하였다.

3. 調速機系의 動作特性

原動機측의 速應能力의 限度, 系統運用面에서 본 計劃運轉의 必要性등의 이유로부터 일부 發電機는 Load Limitter를 사용해서 調速機를 어느 주어진 運轉狀態로 고정시키는 이른바 一定出力運轉을 할 경우가 있겠지만 그렇지 않은 發電機는 不時的 계통사고등에 의한 出力-負荷間의 均衡이 깨어지는 사태에 대비해서 調速機 Free運轉을 하게 된다.

개개의 調速機特性은 그 구조라던가 각부의 기능에 따라 될 수 있는대로 엄밀하게 취급해서 다루어야 하겠지만 여기서는 이것이 系統內의 一部要素로서, 또 각각 特性이 다른 發電機를 평균적인 特性을 가지는 等價發電機로 대표해서 나타내었으므로 이것을 簡略化하지 않을 수 없을 것이다. 이에 대해서는 여러가지로 검토한 결과 아래와 같이 이들 特性을 簡易表現해서 취급하기로 하였다.

3.1 水力發電所 調速機動作

水力發電所 調速機動作의 기본적인 傳達函數는 그림 2-(a)처럼 表現된다. 여기서 서오보 모터(Servo Motor) 時定數 T_1 은 亂調防止回路時定數 T_2 (= 彈性復元時定數)에 비해 훨씬 작기 때문에 이것을 생략해서 同 그림 (b)처럼 1次遲延系로 近似시킬 수 있다(4).

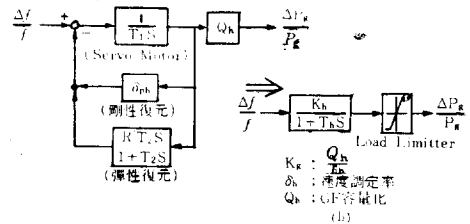


그림 2. 水力發電所 調速機 構成圖

Fig.2. Block diagram of water turbine governor

3.2 火力發電所 調速機動作

火力發電所의 調速機特性은 水力發電所의 그것에 비하여 調速機機構의 應答이 훨씬 빨라서 무시해도 좋을 것으로 생각되지만 최근의 再熱型터빈(Turbine)을 갖는 發電所에 있어서는 터빈의 高, 中低壓段의 時間的遲延을 고려할 필요가 있기 때문에 이번 검토에서는 그림 3처럼 그 動作特性을 터빈의 速應分(時定數 $T_{s*}=1$ 秒)과 緩動分(時定數 $T_{s1}=20$ 秒)으로 나누어 표현하도록 하였다(4).

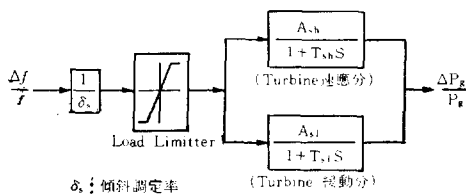


그림 3. 火力發電所 調速機 構成圖

Fig. 3. Block diagram of steam turbine governor.

4. 計算方法 및 解析條件

電源脫落時의 周波數低下特性 및 瞬動에 비력의 應動特性, 그리고 負荷遮斷에 의한 周波數改善效果등에 관한 구체적인 計算은 앞서 개발하였던 엘고리즘⁽²⁾에 前述한 調速機動作特性을 포함시켜서 풀기로 하였다. 計算系統은 1976年末 우리나라 系統을 對象으로 하였으며 負荷水準으로서는 최대부하 3,500MW, 深夜輕부하 2,500MW, 평균 3,000MW의 세가지 狀態를 가정하였다.

참고로 그림 4는 이때의 計算系統Block圖를 보인 것인 바 여기서 電力系統의 m,n는 각각 水火力配分比를 나타낸 것이며 T_w, T_s는 水火力系統의 等價時定數를 표시한 것이다. 表 1은 이때 사용한 系統運用條件에 관한 각종 定數를 整理한 것이다.

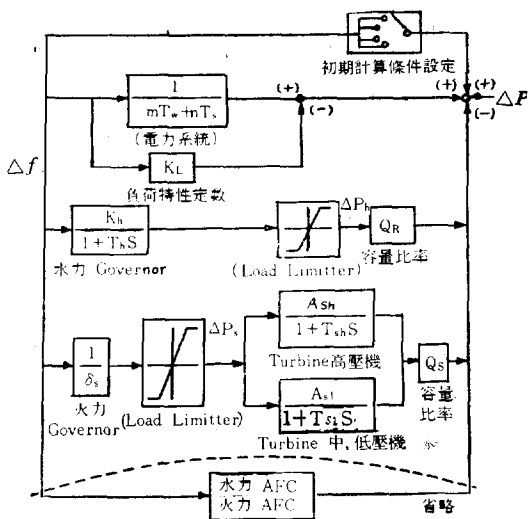


그림 4. 計算系統構成圖

Fig. 4. Block diagram of model system.

表 1. 解析條件(各種 定數)

Table 1. Constants of analysis condition

項	目	記號	定 數
固 定 數	負荷特性定數	K_L	4% Mw/∞ (=2.4pu)
	發電電力 特性定數	K_G	6% Mw/∞ (=3.6pu)
	發電機單位慣性定數	H	3.5 秒
	水力調速機 時定數	T_h	10.0 秒
	水力調速機速度調定率	δ_{ph}	3.0 %
	火力高壓段分擔率	A_{sh}	40 %
	火力高壓段時定數	T_{sh}	1.0 秒
數	火力中低壓段分擔率	A_{sl}	60 %
	火力中低壓段時定數	T_{sl}	20.0 秒
	火力傾斜調定率	δ_{ps}	5.0 %
	電源脫落量	ΔP	5~25 %
可 變 定 數	水力GF容量比	Q_h	0~60 %
	火力GF容量比	Q_s	0~80 %
	水力GF運轉餘力	ΔP_h	0~20 % (定格出力對比)
	火力GF運轉餘力	ΔP_s	0~20 % (" ")
	系統負荷水準(76末)		2,500Mw, 3000Mw, 3,500Mw

5. 瞬動豫備力の 基礎特性

5.1 應答特性과 周波數改善效果

먼저 電力系統에서 갑자기 發電機가 脫落했을 경우 系統周波數의 움직임 및 이때의 瞬動에 비력의 應動狀況을 그림 5에 보인다.

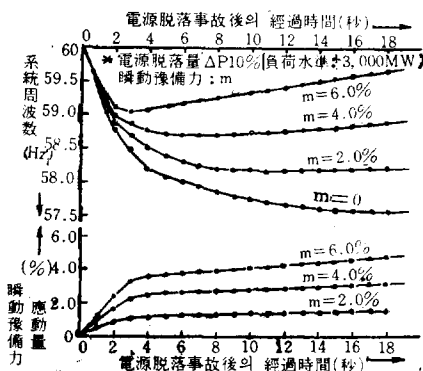


그림 5. 瞬動豫備力과 周波數變動曲線

Fig. 5. Spinning reserve and frequency recovery curves.

電源脫落에 따른 系統周波數의 變動特性은 電源脫落量의 크기, 瞬動에 비력의 應動量등에 따라 어느 정도 차이가 있겠으나 일반적으로 系統周波數는 電源脫落 직후부터 떨어지기 시작해서 數秒내지 10秒전후에서 最低

値에 달하고 그 후 예비력의 應動에 따라 서서히 回復 되는 것이 보통이다. 그림 5는 系統負荷가 3,000Mw인 運轉狀態에서 電源脫落量(ΔP)의 크기를 10%인 300 Mw로 가졌었을 때의 變化를 구해 본 것인데 이때 GF運轉發電機의 出力應動에 따른 周波數改善效果는 현저하게 나타나고 있다. 가령 예비력이 4%이상水準으로 확보되어 즉시에 발동된다면 이 정도의 電源脫落事故時에도 아무런 負荷制限없이 系統周波數를 58.5사이클 이상으로 계속 유지해 나갈 수 있다는 것을 알 수 있다. 한편 예비력의 應動에 있어서도 특히 火力發電所調速機의 터빈高壓段에서의 速應分の 應動이 커서 電源脫落 직후 5~6秒이내에 예비력으로서의 全可能出力의 80% 이상을 발동하여 系統周波數의 低下를 완화하는데 크게 기여하고 있음을 볼 수 있다.

그림 6은 瞬動豫備力の 크기를 파라미터로 해서 電源脫落量의 크기와 周波數低下量과의 관계를 정리해서 보인 것이다.

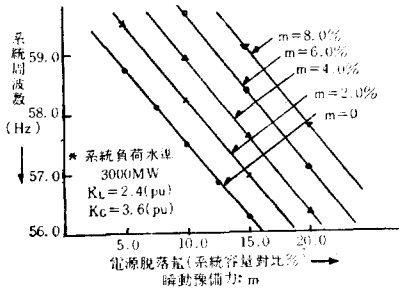


그림 6. 電源脫落量과 周波數低下特性
Fig. 6. Outage of generator and frequency decay curves.

이 결과에 의하면 電源脫落事故時 系統周波數를 가령 58.5사이클 이상으로 유지하고자 한다면 瞬動에비력 保有量이 3%일 경우에는 系統容量에 비해 10%정도까지의 電源脫落事故를, 예비력保有量이 6% 이상일 경우에는 15% 정도의 電源脫落事故에도 瞬動에비력에 의한 系統自體의 힘만으로 충분히 견디어 나갈 수 있다는 것을 알 수 있다. 그러나 한편 어느범위로 가정된 電源脫落事故에서 系統周波數를 일정한 허용범위내에 유지하는데 소요되는 瞬動豫備力保有量은 이러한 計算을 통해서 미리 그 크기를 推定할 수 있겠지만 실제로는 후술하는 自動負荷制限方式의 適用과 관련시켜 상당량의 餘裕를 가지고 系統運用에 임하는 것이 보다 현실적이고 바람직한 것이다.

5.2 瞬動豫備力과 諸特性的 영향

다음에는 瞬動豫備力에 있어서 諸特性이 어떤 영향

을 미치고 있나를 살펴보았다. 먼저 調速機 Free運轉(GF)容量의 水火力比率에 따른 周波數改善效果를 본다면 火力GF보다도 水力GF의 容量비율이 증가함에 따라 그 효과가 나아지고 있으며 따라서 전체의 瞬動豫備力必要量도 이에 따라 작아지는 경향을 볼 수 있었다. 그러나 현재 우리나라系統의 現況에서는 水力이 차지하는 비율이 系統容量에 비해 기껏해야 10~20% 정도 밖에 되지 않음으로 이의 영향은 거의 무시할 수 있을 것으로 생각되며 실제 계산에서는 이 비율($Q_h : Q_g$)을 10 : 90으로 고정하였다.

다음에 각發電機當의 運轉餘力和 瞬動豫備力必要量과의 관계를 본다.

그림 7에서 곧 알 수 있듯이 瞬動豫備力을 保有함에 있어서 小數의 한정된 調速機運轉發電機에서 1台當의 調速機運轉餘力을 크게 해서 그 分擔을 늘리는 것보다도 1台當의 運轉餘力은 작아도 多數의 發電機에 分散시켜 그 運轉容量을 늘리도록 하는 것이 실제의 瞬動豫備力の 應動特性(곧 卽應性)이 좋아진다면가 전체로서의 瞬動豫備力必要量을 작게 할 수 있다는 점에서 가능한한 瞬動豫備力은 分散配置해서 保有하도록 함이 좋을 것이다.

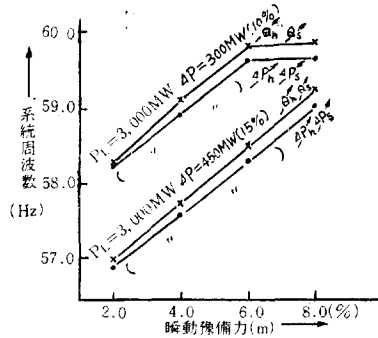


그림 7. 瞬動豫備力과 周波數改善效果
Fig. 7. Frequency recovery curves by varying spinning reserve.

이밖에 火力發電機의 調速機出力은 터빈高壓段의 速應분에 의한 영향을 많이 받아 그 비율이 높아짐에 따라 그 應動特性도 좋고 전체의 예비력 必要量이 작아지는 경향을 보이고 있었으나 본점토에서는 이것 역시 우리나라系統에서의 調速機運轉現況을 감안하여 速應分과 緩動分の 비율을 40 : 60으로 고정해서 처리하였다

6. 瞬動예비력과 系統의 最適運用方式

6.1 瞬動예비력과 負荷遮斷所要量

앞서 본 바와 같이 電源脫落量이 系統容量에 비해 어느정도 작을 때에는 負荷制限없이 瞬動豫備力の 應動만

으로 系統周波數低下를 일정한 許容限度이상으로 유지할 수 있을 것이다. 그러나 電源脫落量이 系統容量의 15%이상으로 커지면 이에대한 긴급대책으로서 이른바 低周波數繼電器(Under Frequency Relay: UFR)의 動作을 중심으로 한 自動負荷遮斷을 적용시켜야만 할 것이다. 물론 이경우에 있어서도 瞬動豫備力の 適正保有는 전체의 負荷遮斷所要量(ΣL_{di})을 大幅줄이고 系統周波數의 움직임에 대해서도 이의 回復段階에서 그 改善에 크게 기여하게 될 것이다.

그림 8은 電源脫落量の 크기를 系統容量의 10~25%로 가정하였을 때 系統周波數의 低下를 일정한 許容限度值(여기서는 58.5사이클) 이상으로 유지하는데 소요되는 負荷遮斷所要量을 瞬動豫備力を 파라미터로 해서 보인 것이다.

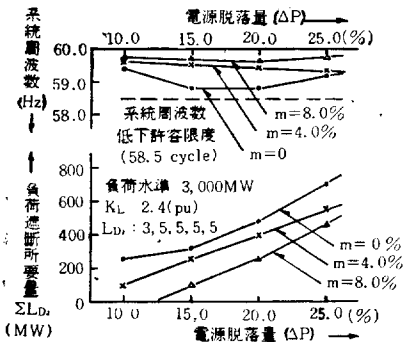


그림 8. 瞬動豫備력과 負荷遮斷所要量
Fig. 8. Spinning reserve and load shedding requirement.

그림에서 곧 알 수 있듯이 電源脫落量이 비교적 커졌음에도 불구하고 上記 運用條件이 만족되고 또한 瞬動豫備力の 保有量이 늘어남에 따라 負荷遮斷所要量이 현저하게 감소되고 있다.

그림 9는 다시 이상의 결과로부터 瞬動豫備력과 負荷遮斷所要量과의 관계를 정리해서 보인 것이다.

이에 따르면 大電源脫落事故時에 있어서 瞬動豫備力

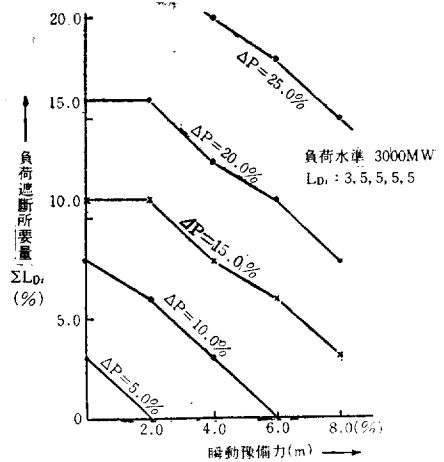


그림 9. 瞬動豫備력과 負荷遮斷所要量
Fig. 9. Spinning reserve and load shedding requirement.

의 확보량이 2%정도로 아주 적을 때에는 그 효과가 별로 나타나지 않지만 이것이 2%이상으로 그 크기가 늘어남에 따라 瞬動예비력의 保有量에 비해 負荷遮斷所要量을 100~150%의 비율로 大幅 감소시키고 있음을 확인할 수 있다.

한편 負荷遮斷에 의한 周波數改善效果는 어디까지나 이것이 UFR에 의한 瞬時動作으로 遮斷되는 것이기 때문에 系統周波數가 最低值到達이전에 대부분이 단계적으로 차단되어 주로 周波數의 低下特性완화에 직접 공헌하게 되는데 反하여 瞬動예비력의 그것은 調速機의 Load Limiter에 걸릴때까지 연속적으로 그 出力을 증가시키면서 全區間(20초정도)에 걸쳐 周波數改善에 기여하게 되는 것이라고 말할 수 있을 것이다.

6.2 瞬動豫備력과 自動負荷制限方式

앞서 大電源脫落事故時에 이어서 數분될 負荷遮斷實施에 있어서의 最適運用패턴에 관한 검토 결과 얻어진 最適 負荷制限方式(곧 UFR 整定值)을 중심으로 瞬動예비

表 2. 最適負荷制限方式(UFR整定值)
Table.2. Optimum load shedding program

UFR 整定	$\frac{df}{dt}$ 要素 檢出	UFR 整定(瞬時遮斷)					Time Relay 要素檢出	
	$\frac{df}{dt} > \delta$ (設定值)	59.0	58.5	58.0	57.5	57.0	58.5Hz이하	59.0Hz 이하
負荷遮斷	58.5Hz 瞬時遮斷	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	10秒지속	15秒지속
負荷遮斷量(%)	7.0	3.0	5.0	5.0	5.0	—	3.0	3.0

력을 파라미터로해서 여러가지 負荷制限方式을 적용시켜보았으나 系統周波數의 制御에 관한 質이라던가 負荷遮斷所要量과의 關係에서 表 2처럼 앞서 얻었던 最適 UFR 整定條件을 그대로 決定시켰으면 좋을 것이라는 결론을 보았다.

7. 結 論

重大事故對策의 一環으로서 大電源脫落事故時에 있어서도 系統周波數의 低下를 所定の 許容限度이상으로 유지하고 周波數低下에 의한 과도한 負荷制限이나 火力發電機의 連鎖的脫落到 다른 二次的波及事故에의 확대를 방지하기 위하여서는 瞬動豫備力의 適正保有 및 運用이 중요하다.

本文中에서는 주로 調速機 Free 運轉餘力을 중심으로 구성되고 있는 瞬動豫備力에 관한 基礎特性, 電源脫落量과 瞬動豫備力必要量과의 關係, 그리고 瞬動豫備力을 고려한 最適負荷制限方式의 수립에 關해서 여러가지 검토한 결과 다음과 같은 몇가지 결론을 얻을 수 있었다.

1. 瞬動豫備力目標量

瞬動豫備力保有의 目標値는 예상될 電源脫落量의 크기 및 이때의 周波數低下 許容限度등에 따라 그 크기가 결정되겠지만 앞으로 예상될 300Mw級新銳火力發電機의 突發的脫落到 대비해서 최소한 3% 이상의 瞬動豫備力을 갖도록 하는것이 바람직하다. 300Mw라면 76年末負荷水準에서 約 10%에 해당하는 脫落量이 되겠는데 이 정도의 사고에 대해서는 自動負荷制限方式에서의 df/dt 檢出要素分遮斷을 위한 整定値를 적당히 조정하므로써 負荷遮斷所要量을 2~3% 감소시킬 수 있을 것이다.

2. 瞬動豫備力保有方法

瞬動豫備力은 주로 調速機 Free 運轉發電機에 의하여 保有되겠지만 電源脫落事故時 순동예비력으로서 기대할 수 있는 것은 水, 火力 공히 Load Limiter까지의 餘力이다. 한편 이의 動作特性 및 系統特性的 向上을 위해서 또한 보다 효율적인 瞬動豫備力の 運用을 위해서는 이것을 小數의 發電機에 집중적으로 分擔시키는 것보다도 多數의 並列發電機에 分散配置토록하는 것이 좋을 것이다.

이밖에 瞬動豫備力の 把握, 管理에 있어서는 前日의 發電計劃段階에서 충분히 目標値를 分散해서 보유할 수 있도록 미리 並列發電機를 결정하고 當日의 運用에 있어서는 周波數를 극력 基準値에 유지시킴으로써 周波數變動에 의한 瞬動豫備力の 잠식을 방지하여 電源脫落時 충분히 그 기능을 다 할 수 있도록 하여야 할 것이

다.

3. 最適負荷制限方式과의 關連

앞으로 古里原子力(595Mw)과 같은 大電源脫落事故時에는 UFR에 의한 負荷遮斷이 불가피하겠지만 이때 적용할 負荷制限方式으로서는 앞서 제시하였던 最適負荷制限方式(UFR整定値)을 그대로 채용하는 것이 가장 有效하다는 것을 재삼 확인할 수 있었다.

本研究를 수행하는데 있어서 귀중한 資料 및 많은 도움을 주신 韓電系統運用部 徐亨烈次長 및 同部 李暉宰 中央給電指令所長, 그리고 企劃管理部 電源開發課의 金永昌氏에게 깊은 謝意를 表하는 바이다.

끝으로 本研究는 1975年度 產學財團 研究助成金으로 이루어진 것임을 밝히고 이자리를 빌려 關係諸位에게 깊이 感謝하는 바이다.

參 考 文 獻

1. 宋吉永外：“大電源脫落事故時의 系統搖搖特性解析” 大韓電氣學會誌 Vol. 24 No.2 1975. 3
2. 宋吉永 李暉宰：“最適負荷制限方式의 適用에 關한 研究” 大韓電氣學會誌 Vol. 24 No.2 1975. 3
3. 宋吉永：“古里原子力의 系統併入에 따른 問題點檢討” 韓電 技術研究報告書 1975. 2
4. 日本中央電力協議會：“瞬動豫備力에 關한 檢討結果報告書” 1967. 9
5. 山崎久一：“瞬動豫備力” 日本電氣學會誌 Vol. 89 ~8 No.971 1969
6. 奧田, 後藤：“系統事故時에 있어서의 周波數變動特性” 日本電氣學會誌 Vol. 87~10 No 949, 1967
7. 韓電發電部：“電力系統의 自動周波數制御” 給電研究 10701. 1971.
8. 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 Mar. 1968
9. D.K. Subramanian “Optimum Load Shedding through Programming Techniques” IEEE Vol. PAS-90 pp.89~95 Feb. 1971
10. R.M. Maliszewski, R.D. Dunlop, G.L. Wilson “Frequency actuated Load Shedding and Restoration PART- I Philosophy PART- II Implementation IEEE Summer Power Meeting July 1970