

전원탈락량의 추정치를 이용한 부하제한방식에 관한 연구

김 상암^o 이 병준* 송 길영*

* : 고려대학교 전기·전자·전파공학부

A Study on the Design of a Load Shedding Program using Estimated Power Outage Amount

S.A. Kim^o B.J. Lee* K.Y. Song*

* : Korea University

Abstract - This paper proposes the automatic load shedding program using estimated power outage amount. Power outage amount estimation is implemented by the inverse problem analysis.

1. 서 론

본 연구에서는 역문제(Inverse problem)해석법의 일종인 지배미분방정식의 추정법을 이용하여 전원탈락량을 구해내는 방법을 제안한다. 계통과도시 주파수변동을 지배하는 식은 미분방정식으로 표현이 된다. 역문제해석법[3]에 의하면 미분방정식의 초기조건인 전원탈락시의 전원탈락량을 추정하는 것이 가능하다. 이 방법을 적용하여 과도시 계통주파수 변동치로부터 직접 전원탈락량의 추정을 행하여 그 추정치를 이용해 주파수정정치에 따른 부하차단방식을 개선하여 총부하차단량을 가변적으로 조절하여 효율적인 부하차단을 실시할 수 있다. 이렇게 함으로써 크고 작은 전원의 탈락시 다단계차동부하차단의 각 단계별 차단량의 크기를 일부 조절하여 뛰어난 제어효과를 얻을 수 있다.

2. 역문제해석법에 의한 전원탈락량의 추정

2.1 전원탈락사고의 기초방정식

대전원 탈락시의 주파수 저하특성계산에서는 특히 조속기의 표현 및 부하의 주파수 특성에 대한 검토가 필요하다. 따라서 여기서는 이들 내용을 포함한 전원탈락시의 계통주파수 변동상황을 다음 식으로 나타내기로 한다.[2]

$$\frac{d}{dt}(\Delta f) = \frac{f_s \left\{ B - \frac{\mu}{(1 + \beta/P_G)K_L} \right\} - \Delta f}{T} \quad (2.1)$$

$$B = \frac{\beta}{(1 + \beta/P_G)P_G K_L}, \quad T = \frac{2H}{(1 + \beta/P_G)P_G K_L}$$

사용하는 기호는 다음과 같다.

f_s : 기준 주파수 (cycle/sec)

P_G : 전원 탈락직후의 발전력 (MW)

β : $P_L - P_G$, 전원 탈락직후의 부하와 발전력의 불균형분 (MW)

μ : 조속기의 효과에 의한 발전력증가율 (%)

m : 계통의 순동운전예비율 (%)

T : 조속기의 시정수 (sec)

$2H'$: $2H \times$ 전원의 정격MVA (H 는 단위관성정수)

K_G : 발전전력 주파수 특성정수

(p.u. MW/p.u. cycle)

K_L : 부하주파수 특성정수 (p.u. MW/p.u. cycle)

s : d/dt

한편 갑자기 전원이 탈락되었을 때 그 순간에 있어서는 조속기의 응답이 따르지 못한다. 따라서 전원탈락 직후의 주파수특성은 (2.1)식에서 $\mu=0$ 으로 두어 둔 다음의 식으로 살펴볼 수 있다.

$$\Delta f = \frac{\beta/P_G}{K_L(1 + \beta/P_G)} (1 - e^{-t/T}) \quad (2.2)$$

2.2 지배미분방정식의 추정법에 의한 전원탈락량의 추정

전원탈락직후의 중심주파수의 지배식 (2.2)을 시간에 대해 미분하여 정리하면 다음과 같은 형태의 선형1계미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta f + \left(\frac{1}{T} \right) \Delta f - \frac{k}{T} = 0$$

이 때 $k = \frac{\beta/P_G}{K_L(1 + \beta/P_G)}$ 이다.

즉, 다음과 같이 미분항의 계수가 1인 일반적인 미분방정식의 계수를 구하는 전형적인 역문제가 됨을 알 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta f + a_1 \Delta f + a_2 = 0 \quad (2.3)$$

표본주기(sampling period)를 h 로 하고 얻은 시계열데이터(주파수변동치)를 이용하여 최소자승법으로부터 해를 얻기 위해, 각 표본시간에서의 중심주파수변동치를 $\Delta f_1, \Delta f_2, \dots, \Delta f_n$ 으로 두고, 또 그의

(m)계 미분치를 $\Delta f^{(m)}_1, \Delta f^{(m)}_2, \dots, \Delta f^{(m)}_n$ 로 하면 각 벡터와 행렬은 다음과 같다.

$$A = \begin{bmatrix} -\Delta f_1 & -1 \\ -\Delta f_2 & -1 \\ \vdots & \vdots \\ -\Delta f_n & -1 \end{bmatrix}, X = \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} \Delta f_1^{(1)} \\ \Delta f_2^{(1)} \\ \vdots \\ \Delta f_n^{(1)} \end{bmatrix}$$

따라서 다음의 연립방정식을 풀면 미분방정식의 계수 a_1 과 a_2 를 얻을 수 있다.

$$AX=B \quad (2.4)$$

(2.4)식의 최소자승해는 (2.5)식을 주어진 다. B행렬의 요소인 주파수변동치의 1계미분치는 (2.6)식과 같이 후진차분(backward difference)을 이용하여 구한다.

$$X=(A^T A)^{-1} A^T B \quad (2.5)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta f_k = \frac{\Delta f_k - \Delta f_{k-1}}{h} \quad (2.6)$$

한편 식 (2.3)의 계수들은

$$a_1 = -\frac{1}{T} = \frac{(1 + \beta/P_G)P_C K_L}{2H}$$

$$a_2 = \frac{k}{T} = \left(\frac{\beta/P_G}{K_L(1 + \beta/P_G)} \right) \left(\frac{(1 + \beta/P_G)P_C K_L}{2H} \right)$$

$$k = -\frac{a_2}{a_1}$$

과부하율 $OL(= \beta/P_G)$ 과 전원탈락량 β 다음 식으로 구할 수 있다.

$$OL = \frac{kK_L}{(1 - kK_L)} \quad (2.7)$$

$$\therefore \beta = \frac{OL \times P_L}{1 + OL} \quad (2.8)$$

그림 2.1은 주어진 데이터(전원탈락시의 계통주파수저하치)로부터 전원탈락량을 추정하는 순서도를 그린 것이다.

3. 전원탈락량의 추정량에 기초한 자동부하제한방식

지금까지의 자동부하차단방식은 전원탈락직후 사전에 UFR을 계통주요지점에 적정배치시키고 이의 동작주파수정정치를 몇 단계로 설정시켜 놓음으로써 전원탈락에 뒤따르는 계통주파수의 저하치에 대응해서 지정된 부하를 차례차례로 차단해나가도록 하고 있다.[1]

3.1 자동부하제한방식의 소요부하차단량

전원탈락시 계통부하 및 발전기출력 사이의 불균형으로 일어나는 과부하율에 따른 소요부하차단량은 식 (3.1)으로부터 구할 수 있다.[1]

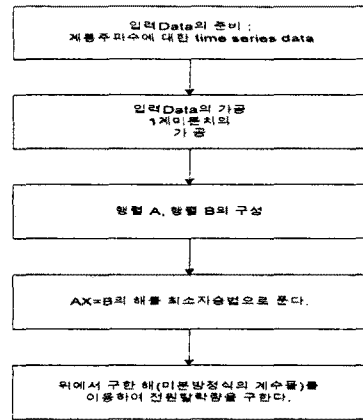


그림 2.1 전원탈락량의 추정알고리즘

$$L_D = \frac{OL_{EXCL}}{1 + OL_{EXCL}} - K_L \left(1 - \frac{f}{f_s}\right) \times 100(\%) \quad (3.1)$$

단, f : 최종주파수목표치 (cycle/sec)

P_L : 부하 (MW)

P_G : 발전력 (MW)

K_L : 부하특성정수(%MW/Hz)

ΔP_G : 순동예비력의 응동효과에 의한 발전력의 증가분(%)

OL_{EXCL} : 순동예비력의 응동효과를 무시한 경우의 과부하율(%)

3.2 전원탈락량의 추정치를 이용한 부하제한방식

본 연구에서는 소전원과 대전원 탈락사고시 모두 주파수의 저하를 긴급하게 제어할 수 있도록 5단계 UFR자동부하제한방식을 기본으로 하고, 대전원탈락시 빠른 시간내에 전원탈락량의 추정을 행하여 이 추정치를 이용하여 순시부하차단외에 별도의 추가부하차단량을 설정하여 1단계의 부하차단량에 포함시켰다. 추가부하차단량은 (3.2)식을 이용한다.

또 부하차단량의 부족 등(UFR의 동작실패포함)의 이유로 계통주파수의 완전한 회복이 안되는 경우를 방지하기 위한 회복용 부하제한요소로서 시간 지연 요소(PLDLL)을 추가로 고려하였다.

표 3.1 5단계부하제한방식의 부하배분량

1단계 59.5[Hz]	2단계 59.3[Hz]	3단계 59.0[Hz]	4단계 58.5[Hz]	5단계 58.0[Hz]	합 계
1.5%		3%			고정 16% +
LD_{add} (가변량)	2.5%	시간지연 요소 2%	3%	4%	전원탈락량 추정에 의한 가변량

$$LD_{add} = (LD_{est} - LD_{pre}) \times 100(\%) \quad (3.2)$$

단, LD_{add} : 추가부하차단량

LD_{est} : 전원탈락량의 추정치를 대입하여 계산된 총소요부하차단량

LD_{pre} : 주파수정정치에 의한 부하차단량

4. 사례연구

계통용량이 18,000[MW]이고 전원탈락량이 2,349[MW], 3,366[MW], 4,667[MW], 5,671[MW], 6,312[MW]인 경우 계통주파수의 저하치로부터 전원탈락량을 추정하였다. 부하 주파수특성정수 $K_L = 2.4$ [p.u.], 계통관성정수 $H = 4.0$ [p.u.]로 하였다. 또 순동예비력은 계통용량비 10%(약 1,800[MW])로 하였다. 전원탈락직후 0.02초부터 0.1초까지의 시계열 데이터(주파수저하치)를 가지고 전원탈락량을 추정하였다. 그림 4. 1에 각 전원탈락량에 따른 주파수의 저하현상을 도시하였다. 표 4. 1은 전원탈락량의 추정결과이다.

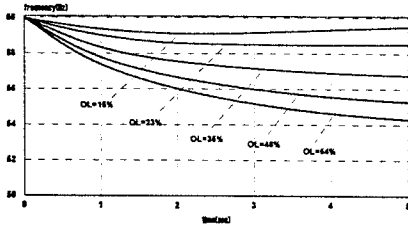


그림 4. 1 각 전원탈락량에 따른 주파수저하현상

표 4. 1 전원탈락량 추정결과

실제 전원탈락량(과부하율)	전원탈락량의 추정치[MW]	오차(%)	조건수
2,349MW(15%)	1826.78	-22.19	45.22
3,366MW(23%)	2855.18	-15.17	29.68
4,667MW(35%)	3672.38	-21.31	19.80
5,671MW(46%)	4749.82	-16.25	15.31
6,312MW(54%)	5347.28	-15.28	13.25

제안된 방안의 유용성을 검증하기 위한 기존방안은 표 4. 2와 같고, 표 4. 3에 기존방안과 제안방안의 부하제한실시결과를 비교하였다. 제안방안이 최저주파수와 최종주파수면에서 기존방안보다 유리함을 알 수 있다. 그림 4. 2에 전원탈락량 6,312[MW]일 때 부하제한을 실시하여 주파수가 회복되는 상황을 도시하였다.

표 4. 2 기존방안의 부하배분량[4]

1단계 59.5[Hz]	2단계 59.3[Hz]	3단계 59.0[Hz]	4단계 58.5[Hz]	5단계 58.0[Hz]	합 계
1.5%		4%			
df/dt 검출요소 5%	2.5%	시간지연 요소 3%	5%	5%	26%

표 4. 3 부하제한 실시결과

전원탈락량	방 안	부하차단량(MW)	최저주파수 [Hz]	최종주파수 (Hz)
15%	기존	720	59.26649	59.86948
	제안	720	59.26649	59.86948
23%	기존	1,440	58.93983	59.92083
	제안	1,260	58.92870	59.90388
35%	기존	2,700	58.59568	59.97477
	제안	2,520	58.54207	59.88529
46%	기존	3,600	58.23695	59.72047
	제안	3,960	58.47148	59.90428
54%	기존	4500	57.94066	59.86785
	제안	4500	58.45534	59.88906

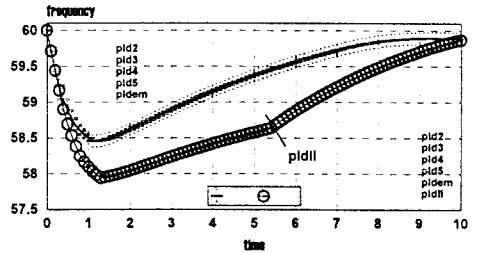


그림 4. 2 과부하율 54%일때 부하차단에 의한 주파수회복상황

3. 결 론

제안하는 방법에서는 역문제를 이용한 추정해석법을 응용하여 주파수저하치, 즉 미분방식의 해로부터 역으로 초기조건 즉, 전원탈락량을 구하였다. 또한 그 추정치를 이용하여 부하차단량을 결정함으로써 가변적으로 부하차단을 행하여 지나치게 과도한 부하제한을 실시하는 것을 막고, 주파수정정치에 의한 자동부하제한방식과 병행함으로써 소전원과 대전원의 탈락에 모두 효율적으로 대처하는 방안을 제안하였다.

(참 고 문 헌)

- [1] 송 길영, 이 경재, “최적부하제한방식의 적용에 관한 연구”, 대한전기학회지, Vol. 24, No. 2, 1975.3
- [2] 송 길영, 전력계통의 해석 및 운용, 동일출판사, 1984
- [3] 藤田吾郎, 白井吾郎, “支配微分方程式の推定法に基づく電源脱落量推定”, 學會論B, 116卷5号, 平成8年
- [4] 심 호근, “피지적분을 이용한 최적부하제한방식의 선정에 관한 연구”, 고려대학교 대학원 전기공학과 석사학위논문, 1993