

저주파계전기 정정의 적합한 방법에 의한 부하차단 적용연구

정재길 · 유현재 · 조양행
 중앙대학교 전기공학과

A Study on The Load Shedding Application by Adaptive Method for Setting Underfrequency Relays

Jai Kil Chung · Hyun Jae Yoo · Yang Haeng Cho
 Chung Ang University

Abstract

This paper propose an adaptive methodology for setting of the underfrequency relays that is based on the initial rate of change of the fequency at the relay. During severe emergencies which result in insufficient power generation to meet load, an automatic load shedding program throughout the affected area can prevent total collapse. To avoid this kind of insufficient power generation, load shedding relays are often applied throughout the system to provide a means of helping balance the load to the remaining generation. Comparing ,it has been found that the use of the proposed method for the amount and the timing of load shed more efficiently than the conventional method.

1. 서 론

전력계통이 예기치 않은 돌발적인 사고로 인하여 대전원이 갑자기 계통으로부터 탈락되면 계통주파수가 이상저하하고 이것이 원인이 되어 다시 발전기의 탈락이 생겨 연쇄적으로 사고가 파급될 수가 있다. 부하와 발전력의 평형유지는 발전력의 증가 또는 부하의 자동 차단으로 대처할 수 있으나 일반적으로 발전력 증가는 주파수 저하를 방지할 수 있을 만큼 신속하지 못하고 또한 충분한 발전예비력을 항상 확보할 수도 없다. 이러한 경우에 저주파수 계전기(Under Frequency Relay:UFR)에 의한 부하의 자동차단은 충분하고도 유효한 수단이 될 수 있다.⁽¹⁾ 그러나 종래의 저주파수 계전기는 각 단계간의 차단량 배분과 차단조건에 있어서 문제점들이 나타나고 있다.⁽²⁾ 이에 본 연구에서는 저주파수 계전기의 정정에서 계통주파수 하락의 초기변화율을 근거로 한 새로운 정정방법을 제시하였다. 본 논문의 유효성을 입증증하기 위하여 WSCC 9모션 Test 모델 계통에 시뮬레이션 한 결과 종래의 방법보다 부하 차단량과 주파수 회복시간이 경감되어 합리적이고 효율적인 정정 방법임을 증명하였다.

2. 계통의 주파수분석

2.1 주파수분석용 모델 구성
 발전기의 동요가 심하여 탈락, 분리된 고립계통의 주파수 동작은 그림 1.로 표시한 바와같이 SFR(System Frequency Responce)모델로 개략적으로 나타낼 수 있으며 이 모델 동작은 이득 K_m , Damping계수 D,관성계수 H,재열평균 시정수 T_R , 재열터빈의 고압분담비 F_H , 등 5개의 요소로 구성되어 있다.

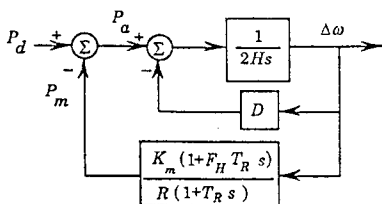


그림 1. 입력에서 외란전력을 갖는 SFR모델

2.2 주파수 분석

이 모델계통에 대해 단위주파수 응답은 다음과 같다.

$$\Delta\omega = \left(\frac{R\omega_n^2}{DR+K_m} \right) \left(\frac{(1+T_{RS})P_d}{s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2} \right) \quad (1)$$

단, 여기서 $\omega_n^2 = \frac{2HRT_R}{DR+K_m}$

$$\zeta = \left(\frac{2HR+2HRT_R+(DR+K_m)F_H T_R}{2(DR+K_m)} \right) \omega_n \quad (2)$$

여기서 식(1)은 다음식으로 변환할 수 있다.

$$\Delta\omega = \left(\frac{R\omega_n^2}{DR+K_m} \right) \left(\frac{(1+T_{RS})P_{step}}{s(s^2+2\zeta\omega_n s+\omega_n^2)} \right) \quad (3)$$

식(3)은 시간영역에서 단위주파수 편차를 고려하면

$$\Delta\omega(t) = \frac{RP_{step}}{DR+K_m} [1 + \alpha e^{-\zeta\omega_n t} \sin(\omega_r t + \phi)] \text{ pu} \quad (4)$$

단, 여기서

$$\alpha = \sqrt{\frac{1-2T_R\zeta\omega_n+T_R^2\omega_n^2}{1-\zeta^2}} \quad (5)$$

이며

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1-\zeta^2} \quad (6)$$

$$\phi = \phi_1 - \phi_2$$

$$\phi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{\omega_r T_R}{1-\zeta\omega_n T_R} \right)$$

$$\phi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{\sqrt{1-\zeta^2}}{-\zeta} \right)$$

그림 2에 외란전력을 갖는 주파수응답을 표시하였다.

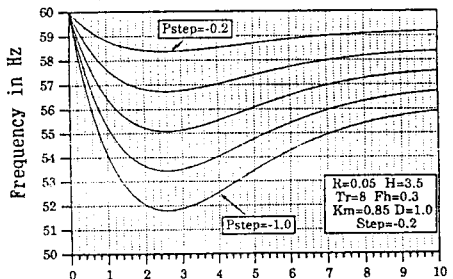


그림 2. 부하외란에 의한 주파수응답

2.3 주파수 분석사례

계통에서 0.6(p.u)정도의 급격한 부하증가가 예상되는 외란이 발생했을 경우 차단되는 단계수와 각 단계별 차단부하량을 결정하는 방식을 분석하기 위한 계통의 평균 파라메타는 다음과 같다.

$$K_m = 0.85 \quad F_n = 0.3 \quad D = 1.0$$

$$T_r = 8.0 \quad H = 3.5 \quad R = 0.06$$

CASE 1) 총 차단부하량이 0.25(p.u)일 경우 표 1.과 같은 은 방식의 정정계획 안을 세웠다.

표 1. 4단계 및 6단계 계획의 주파수 정정치

차단단계	주파수(Hz)		차단량(pu)		지연시간(s)		
	I	II	I	II	I	II	
1	1	59.5	59.5	0.0625	0.048	0.1	0.1
2	2	59.2	59.3	0.0625	0.048	0.1	0.1
3	3	58.9	59.1	0.0625	0.042	0.1	0.1
4	4	58.6	58.8	0.0625	0.040	0.1	0.1
	5		58.5		0.036		0.1
	6		58.2		0.036		0.1

I:4단계 차단 II:6단계 차단

그림 3은 위 CASE 1)에 의한 부하차단 시 차단되는 시간 구도를 나타내고 있다. 두 방식은 거의 동일하나 정격 주파수 유지 관점에서 부하차단량이 정확한 부하 차단시간 보다 더 중요함을 알 수 있다.

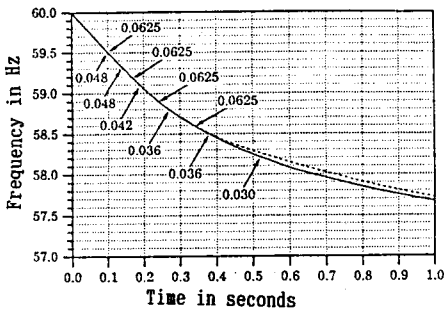


그림 3. 2종류의 부하차단 방식의 비교

3. 저주파계전기 정정방식의 정식화

3.1 부하차단량 결정

매우 큰 외란시 알맞은 부하를 차단하기 위해서 단계별 부하차단량과 단계수가 결정되어 차단을 시작하도록 해야한다. 그러나 이러한 전력이 원활하지 못할 수도 있다. 왜냐하면, 알맞은 양이 주파수 하락을 막을 정도로 충분히 차단되지 않을 수도 있다. 주파수 감소에 대하여 관찰된 기율기를 근거로 한 더욱 좋은 전략은 제1단 또는 제2단에서 더 많은 부하를 차단하는 것이다. 이는 계통주파수 감소의 초기비율을 근거로 하여 부하차단량을 조절할 수 있는 적합한 전략을 제시한다. 그림 1에서와 같이 혼란이 크면 클수록 작은 부하 혼란 보다 더욱 빠른 주파수 감소를 유발시킨다. 그러므로 계통외란의 크기가 증가함에 따라 신속한 조치가 필요하다. 이를 성취하기 위한 한가지 방법은 부하차단 제1단에서의 제거를 확실하게 하기 위해서 충분히 높은 주파수인 59.5(Hz)에서 부하차단 첫단계를 실시하는 것이다. (s) 물론, 외란의 크기로서 단지 어떤 단서를 제공하여 관측된 양은 주파수 하락에 대한 초기기율기이며 이는 다음과 같이 표시된다.

$$m_0 = 60 \frac{d\Delta\omega}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{60 P_{step}}{2H} \quad (\text{Hz/s}) \quad (7)$$

단, m_0 : [Hz/s] 시의 초기 기율기
이 양이 계속적으로 관찰되면 부하차단은 그 기율기가 어떤 한계치를 초과할 때 유발되므로 기율기와 관성정수(평균화 값, 3~5초)를 안다면 다음과 같이 외란의 크기를 신속히 결정할 수 있다.

$$P_{step} = \frac{2Hm_0}{60} \quad (\text{p.u}) \quad (8)$$

모든 모션들은 SFR모델에서 계산된 주파수 기율기가 계통의 평균을 따르는 것으로 간주하므로 정확하게 주파수 변화를 측정할 수 있다. 이를 근거로 분리된 계통에 최대의 외란(1.0 p.u)상태로 놓고 계통보호를 위하여 적정차단량을 결정해 보는 예를 다음과 같이 들었다.
CASE 2) 대표적인 대형 전력계통의 파라메타가 CASE 1)과 동일하다고 할 시 이들 평균 계통 파라메타들로 부터 비진동 고유주파수와 진동정수를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$\omega_n^2 = \frac{DR+K_m}{2HRT_r} = -0.27083$$

$$\omega_n = 0.5204$$

$$\xi = \omega_n \left(\frac{2HR + (DR+K_m)T_r}{2(DR+K_m)} \right) = 1.615\omega_n = 0.84$$

표 2은 위와같은 대표적인 계통상태에 대하여 계산된 초기 기율기와 최대 주파수편차를 나타내고 있다.

표 2. 초기기율기와 최대 주파수편차

P_{step}	m_0	$\Delta\omega_{max}$	f_{min}	
pu	pu/s	Hz/s	Hz	
-0.2000	-0.0286	-1.7143	-1.6438	58.356
-0.3648	-0.0521	-3.1260	-3.0000	57.000
-0.4000	-0.0571	-3.4286	-3.2876	56.712
-0.6000	-0.0857	-5.1429	-4.9313	55.069
-0.8000	-0.1143	-6.8571	-6.5751	53.425
-1.0000	-0.1429	-8.5714	-8.2189	51.781

표 3의 2째 행은 주파수가 57(Hz) 이하로 하락하지 않을 시 허용 가능한 최대 부하단계 변화를 나타낸다. 그러므로 관찰된 초기 기율기가 3.126(Hz/s) 보다 클때 부하차단이 유발될 수 있으며 어떤 외란에 대해 계산된 기율기로부터 0.0521(pu/s)를 빼서 차단될 부하량을 추정 하도록 했다. 증가한 부하차단량은 다음과 같다.

$$P_{shed} = |P_{step}| - 0.0521 \quad (\text{pu/s}) \quad (9)$$

P_{shed} 를 풀고 단계변화에 대하여 식(8)을 대입하면

$$P_{shed} = |P_{step}| - 0.1042Hm_0 \left(\frac{|m_0|}{30} - 0.1042 \right) \quad (\text{p.u}) \quad (10)$$

3.2 적합한 부하차단전략 방안

단위당 부하차단량은 단지 관성정수와 관찰된 기율기의 함수이므로 식(10)에 의해서 부하차단량을 계산하는 데는 근본적인 결함이 있다. 이 계산량만큼 최소이고 실제 차단 시간까지 감소하는 계통주파수의 동특성을 무시하는 "정태 부하차단량"으로 생각할 수 있다. 제시한 총부하차단을 그림 6에 표시했다. 정태 부하차단 이라고 표시된 직선은 식(10)으로 계산되며 부하차단 수행시 지연시간을 고려하여 "동태부하차단"이라는 새로운 곡선을 얻기 위해 정태부하차단 곡선에 5(%)를 추가한다. 중요한 다른 요인은 부하차단시 각 단계의 크기이다. 주파수가 59.5(Hz)에 이룰때 부하차단의 첫 단계를 실시하고 첫 단계의 크기가 주어진 계통의 초기에 대한 총정격의 1/2이 되게하여 큰 외란에 대해 급속히 하락하는 주파수를 빨리 저지하도록 해야한다. 이 초기 부하차단량 관계 를 그림 4에 표시하였다.

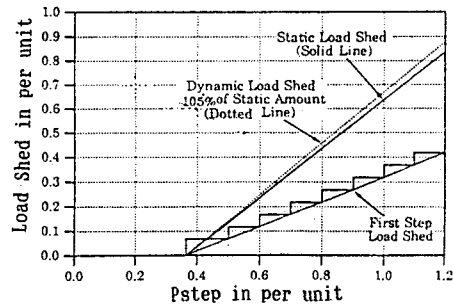


그림 4. 초기기율기를 근거로한 부하차단 전략

3.3 저주파계전기 정정치의 최적배분

여기에서 차단되는 부하량을 결정하기 위해서 식(10)과 그림4를 사용하여 표 3과 같은 차단안을 제시하였다.

표 3.제한한 방법에 의한 부하차단 계획

차단 단계	부하차단 주파수 [Hz]	부하차단량 (p.u)	지연시간 (s)
1	59.5	0.317	0.1
2	59.3	0.10	0.1
3	59.1	0.10	0.1
4	58.8	0.10	0.1
5	58.5	0.05	0.1
총 부하차단량 0.635 x 1.05 = 0.667			

표 3에 있는 각종 계수를 사용하고 주파수 응답은 SFR 모델을 이용하여 계산된다.

4. 사례연구

4.1 모델구성 및 적용 데이터
 본 논문에서 제시한 기법의 효용성을 입증하기 위해서 그림 5와 같은 9모선 10선로 계통으로 3개의 발전기 모선과 3개의 부하모선으로 구성된 WSCC Test 모델을 선정하여 적용하였다. 정격주파수 60(Hz)시 계통의 부하량 및 발전량은 표 4와 같으며, 조속기 Free 운전중 총 계통용량의 30(%)인 #2 발전기가 계통에서 탈락되었을 경우 IBM 3083-KX3을 이용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 적용한 계통의 모선 입력 자의 한 예는 표 5와 같으며 각 계전기 데이터는 현재 사용중인 계전기 데이터 상태와 제시한 안을 표 6에 표시했다.

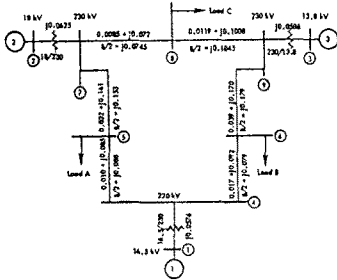


그림 5. WSCC 9모선 계통도

표 4. 계통의 수급상황

발전력		부하	
P(MW)	Q(Mvar)	P(MW)	Q(MVAR)
399	70	395	145

표 5. WSCC 모델계통 모선자료

Bus No	Voltage (p.u)	Angle (deg)	Generation		Load	
			(MW)	(Mvar)	(MW)	(Mvar)
1	1.040	0	176.9	49.5	0	0
2	1.025	9	125.0	17.1	0	0
3	1.025	5	97.5	3.3	0	0
4	1.017	-2	0	0	0	0
5	1.017	-4	0	0	155	60
6	0.980	-4	0	0	110	40
7	0.980	4	0	0	0	0
8	0.996	1	0	0	130	45
9	1.017	2	0	0	0	0

표 6. 계전기 정정지별 비교

차단 단계	주파수 정정지 (Hz)	지연시간(s)		차단량(%)		차단누계	
		I	II	I	II	I	II
1	59.5	0.1	0.1	4	12	4	12
2	59.3	0.1	0.1	5	4	9	16
3	59.1	0.1	0.1	6	4	15	20
4	58.9	0.1	0.1	6	4	21	24
5	58.7	0.1	0.1	5	3	26	27
6	58.5	0.1	0.1	4	3	30	30

I :종래방법 II :본연구방법

모의 실험을 위한 조건은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제시한 저주파계전기 정정 방법과 비교하기 위하여 종래의 주파수 정정지를 상향 조정하였다.
- 2) 차단 단계는 6단으로 하였으며 단계간의 주파수 간격은 0.2(Hz), 지연시간은 각 단계별 공히 0.1(s)로 설정했다.
- 3) 차단량 배분 문제에서 종래의 방법은 현재 사용중인 배분량의 평균치를 사용했으며 본 연구방법에서는 제1,2단계에서 요구하는 차단량의 1/2을 상회하도록 했다

4.2 시뮬레이션 결과 및 고찰

계통을 안정상태로 회복시키기 위하여 부하차단을 실행 결과 처음에는 거의 동일한 값이었으나 시간이 경과 할수록 본 연구방법이 좀 더 빠른 주파수 회복현상을 고찰할 수 있었고(정격주파수 회복시간 I : 4.440초, II : 4.250초) 차단단계에서도 종래의 방법은 6단이었으나 5단계 실시함으로써 계통 안정정도에도 기여할 뿐 아니라 차단량 경감효과도 기할 수 있었다. 표 7, 8과 그림 6은 부하차단 실시후 주파수 회복관계 및 모선전압 변동치의 대비를 나타내고 있다.

표 7. 계통주파수

TT(S)	I	II
0.000	60.000	60.000
0.400	59.244	59.275
1.200	58.501	58.617
1.600	58.354	58.506
2.000	58.403	58.580
2.800	58.680	58.903
3.600	59.194	59.444
4.000	59.557	59.774
4.200	59.769	59.954
4.250	59.825	60.000
4.400	60.000	60.146
4.600	60.349	60.257
5.000	60.840	60.798
최 대	60.921	60.859
최 소	58.361	58.491

표 8. 모선전압

모선 번호	모 선 전 압		
	기준치	I	II
1	1.040	0.8362	0.8394
2	1.025	1.1050	1.1050
3	1.025	0.8926	0.8947
4	1.017	0.8281	0.8297
5	1.017	0.8281	0.8297
6	0.980	0.7999	0.7995
7	0.980	0.7999	0.7995
8	0.996	0.8307	0.8320
9	1.017	0.8371	0.8369
최 대		1.105	1.105
최 소		0.799	0.799

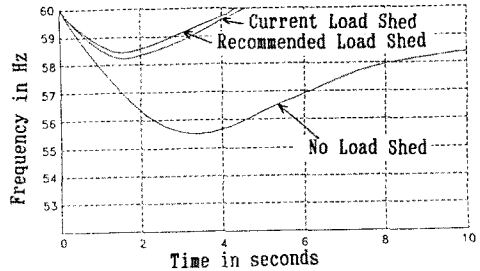


그림 6. 적합한 정정법에 의한 부하차단 결과

5. 결론

본 연구에서는 계통주파수 하락의 초기 변화율을 근거로한 저주파계전기 정정의 적합한 방법에 의해서 부하차단을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 대용량발전기 탈락시 일시적으로 부하를 긴급차단하는 경우 저주파부하차단 계전기의 적합한 정정 안을 제시하였다.
2. 정격주파수 회복시간이 감소(0.19초)하여 결과적으로 부하차단량 감소효과도 기할 수 있었다.
3. 주파수 편차의 폭과 모선전압 변동이 적어(5.3%) 안정도에도 기여하리라고 생각된다.
4. 과도한 불균형에 대하여 현재 한전의 초기주파수 정정치인 58.8(Hz)는 상향조정 하는것이 효과적이라고 여겨진다.

참 고 문 헌

1. H.E.LOKAY and V.BURTNYK, "Application of Underfrequency Relays for Automation Load Shedding", IEEE Trans. pp.776-783, Mar, 1968
2. Wei-Jen Lee, Jyh-Cherng Gu, "A Microcomputer-Based Intelligent Load Shedding Relay", ESRC, University of Texas at Arlington, 1989
3. CHARLES J. DURKIN, JR., "An Underfrequency Relay with Frequency Decay Rate Compensation", IEEE Trans. pp812-819, Jun, 1969