

## An Intelligent System to Prevent Voltage Collapse for A Power system

金 在 顯\*  
(Jaehyeon Gim)

**Abstract** - In order to prevent voltage collapse, this paper introduces the idea of the intelligent system and operating polices for a power system, then presents the results of voltage stability studies for that power system. The intelligent system includes a dedicated computer doing calculation and evaluation jobs and several intelligent relays serving as last guards to carry out the pre-set remedies. In the intelligent system, *P-V* curves are used to determine the operating margin from the current operating point to the maximum operating point, or the nose point. This paper suggests an operating guide for voltage stability of a power system. The effectiveness of location and amount of load shedding for the different power load models are studied.

**Key Words** : Voltage collapse, P-V Curve, Load shedding

### 1. 서 론

전력계통의 붕괴는 여러 가지 복합적인 원인에 의하여 발생하지만 전압 안정도 문제가 원인으로 분석되는 경우가 많다.[1,2] 전압 붕괴 현상으로 계통의 사고가 매우 심각한 경우는 순간적으로 발생하기도 하지만 대부분의 경우는 한 사고에 의하여 연속적으로 사고가 발생되어 일어나며 진행되는 시간은 수 초부터 수 십분까지 매우 다양하다.

전력계통이 붕괴한 후에 복구를 하기 위해서는 많은 노력과 시간이 필요하며 수용가에 미치는 경제적인 손실도 막대하다. 전압안정도가 전력계통 붕괴의 모든 원인은 아니지만 전력계통의 신뢰도를 증진하기 위한 한 수단으로 사용할 수 있으므로 본 논문에서는 전압 붕괴 방지를 위한 한 인텔리전트 시스템을 제안한다.

전력계통이 운전하고 있는 현 상태가 최대 운전점에서 얼마나 여유가 있는지를 결정하는 인덱스와 이의 계산 방법은 다양하다.[3-6] 본 논문에서 제시하는 인텔리전트 시스템은 전력 계통의 현 운전점이 최대 운전점에서 얼마나 여유가 있는지를 유효전력(*P*)과 모션 전압(*V*)의 관계로 작성되는 *P-V* 곡선을 이용하였다. 이를 그림 1에서와 같이 동작여유(OM : Operating Margin)라 한다. 전압 붕괴를 방지하기 위해서는 계통에 얼마의 동작여유가 있는가와 계통의 변화에 따라 운전점이 어떻게 이동되는가에 따른 조치를 취해야 한다. 계통의 운전점은 부하의 정도, 조류의 흐름, 부하 특성, 무효전력 보상 등의 계통의 조건에 따라 변화한다. 앞에서 언급한 것

과 같이 전압 붕괴는 수십분 동안 진행될 수도 있지만 계통의 조건이 변화하면 동작여유도 순간적으로 변화한다. 대부분 전력회사의 계통 운전 지침에는 어떤 계통의 사고에서도 계통이 정상적으로 운전할 수 있는 충분한 동작여유를 유지하도록 하고 있다. 이 동작여유를 유지하기 위한 조치로는 계통의 발전력 재분배, 계통 무효전력 보상장치 투입[7], 부하 관리, 부하분배[8,9]등 여러 가지가 있지만 실제로 운전자가 선택하여 취할 수 있는 조치는 몇 가지만으로 제한된다. 일반적으로 부하 관리나 부하 분배가 운전자가 할 수 있는 대표적인 조치 중의 하나이다.

본 논문은 전압 붕괴를 방지하기 위한 인텔리전트 시스템과 계통 운전 정책과 지침에 사용할 수 있는 한 전력계통의 전압 안정도를 분석했다. 그러므로 계통 운전 정책과 지침을 최종적으로 결정하는 전력회사는 본 논문에서 제시한 운전 정책과 지침을 안내서로 활용 할 수 있다.

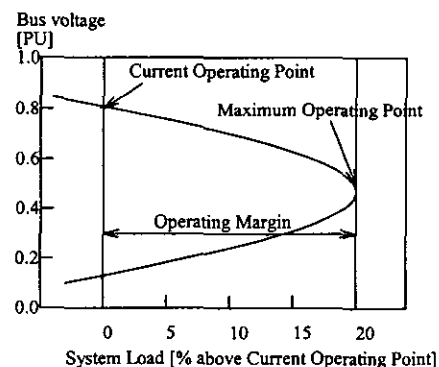


Figure 1 P-V curve and operating margin

그림 1 P-V곡선과 동작여유

\* 正 會 員 : 順天大 情報通信學部 助教授 · 工博  
 接受日字 : 2001年 4月 23日  
 最終完了 : 2001年 9月 12日

## 2. 인텔리전트 시스템

### 2.1. 개요

인텔리전트 시스템은 계통의 상태를 나타내는 동작여유를 계산하고 평가를 할 수 있는 컴퓨터와 운전자가 적절한 조치를 취하지 않으면 미리 설정된 조건으로 조치를 하게 하는 인텔리전트 릴레이로 구성된다. 그리고 인텔리전트 시스템은 운전자가 계통을 세밀히 감시하여 릴레이가 동작하지 않아도 전압 붕괴를 방지 할 수 있는 적절한 조치를 취할 수 있는 충분한 시간적인 여유를 가지고 있다. 그림2는 인텔리전트 시스템의 계통도이다.

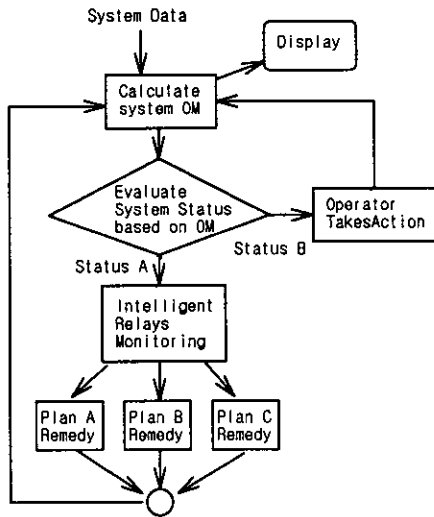


Fig. 2 Functional block diagram of the intelligent system  
그림 2 인텔리전트 시스템의 계통도

이 시스템은 급전 시스템(EMS)으로부터 실시간으로 데이터를 받아 매10분 단위로 부하와 발전량을 예측하고, 계통이 현재 운전되고 있는 P-V곡선을 계산하고, 10분 후의 계통 조건을 예측하여 운전자가 확인 할 수 있게 화면에 표시하게 된다. 이 모든 절차는 자동으로 되며 경보시 경보신호는 화면에 표시하고 경보음으로도 한다.

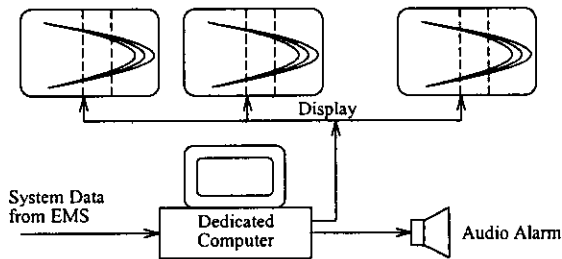


Figure 3. Structure of the intelligent system.  
그림3 인텔리전트 시스템의 구성

그림3은 인텔리전트 시스템의 간단한 구조이다. P-V곡선의 상세한 화면표시는 그림4와 같다. P-V곡선은 과거, 현재 및 미래의 시스템 운전점을 나타내어 계통의 전압 불안정도가 개선되는지 악화되는지를 나타내며, 하루 부하의 증가 추세에

따라 계통 변화 상태를 추가로 나타낼 수도 있다. 일반적으로 부하가 증가하면 P-V곡선은 왼쪽으로 이동하는데 이동하는 정도가 평상시와 다르게 이동하면 전압 불안정 문제가 나타날 수 있으므로 운전자에게 주의 신호를 받는다.

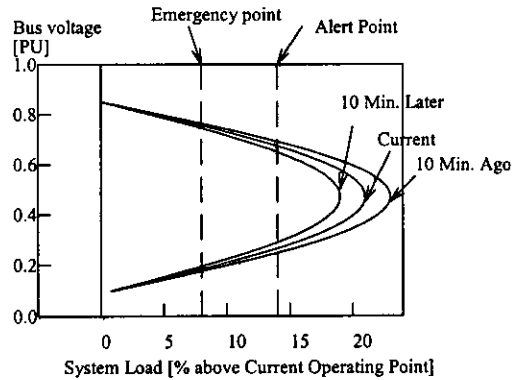
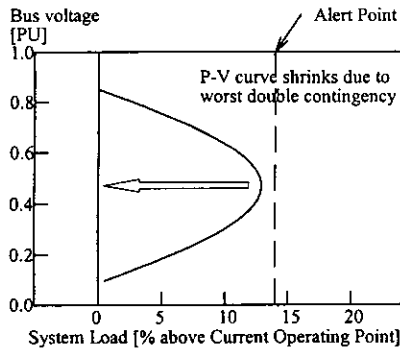


Figure 4 Three P-V curves representing past, current and future system conditions

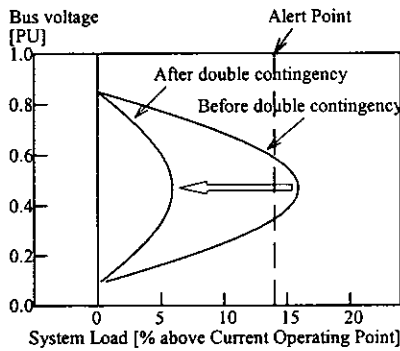
그림 4 과거, 현재, 및 미래의 P-V곡선

### 2.2 정보점과 비상점

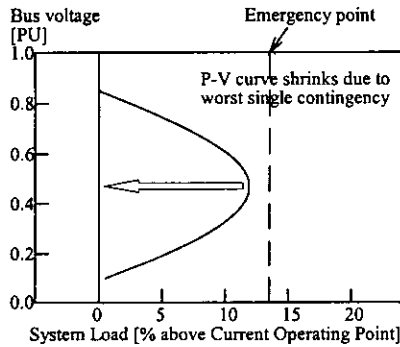
그림4에서 두 가지 기준이 되는 값이 있는데 정보점과 비상점이다. 이 점들은 운전자가 전압 붕괴 방지를 위한 조치를 결정하는 기준이 되는 점으로 중요하다. 그림5(a)~(d)는 계통의 상태를 결정하는데 사용하는 기준이 되는 점들이다. 본 논문에서는 정보점은 계통의 이중 사고 시 계통이 정상적으로 운전될 수 있는 최소 여유를 나타내며, 비상점은 단일 사고에서 계통이 정상적으로 운전될 수 있는 점을 의미한다. 다시 말하면 만일 정보점보다 운전점이 크면 계통에 이중사고가 발생하더라도 계통이 정상적으로 운전될 수 있는 점이고 비상점보다 운전점이 크면 계통에 단일 사고가 발생해도 정상적으로 운전되는 점이다. 이 두점을 구하기 위해서는 모든 경우의 부하조건에서 단일사고와 이중사고일 때의 동작여유의 변화를 분석해야 한다. 예를 들면  $\Delta OM_D$ 를 이중사고중 동작여유가 가장 많은 변화가 있는 점이라 하고  $\Delta OM_S$ 를 단일 사고중 동작여유가 가장 많은 변화가 있는 점이라 하면, 정보점과 비상점으로  $\Delta OM_D$ 과  $\Delta OM_S$ 점을 취할 수 있다. 만일  $\Delta OM_D$ 를 정보점으로 취하거나  $\Delta OM_D$ 보다 큰 여유를 사용하면 어떤 이중 사고에서 계통은 안전하지만 불필요한 부하분배나 부하차단을 하게되며, 만일 전력 회사가  $\Delta OM_S$ 를 정보점으로 하면 모든 경우에 계통이 안전하기에는 적은 부하분배나 부하차단을 하게된다. 표1은 전력계통의 3가지 조건에서 여러 사고인 경우의 동작여유를 나타낸 것이다. 만일  $\Delta OM_S$ 가 5.78%를 정보점으로 하면 최대부하 최대전력전송인 경우에 운전자는 이 조건을 만족하기 위하여 더 많은 부하 차단을 필요로 할 것이다. 그러므로 정보점을 5.78%로 하는 것은 합리적이지 않다.



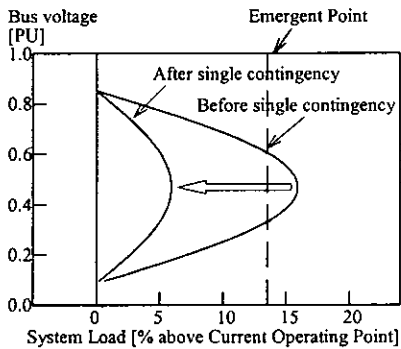
(a) System collapse after a double contingency



(b) System survives after a double contingency



(c) System collapse after a single contingency



(d) System survives after a single contingency

Fig.5 Alert point and Emergent point  
그림 5 경보점과 비상점

Table 1 Percentage operating margin and reduction of margins of severe contingencies for 3 models

표1 모델3의 동작여유와 사고 시 여유변화

		Peak with Max. Transfer		Peak Load		Mid Load	
		OM	$\Delta O$ M	OM	$\Delta O$ M	OM	$\Delta O$ M
Base Case		2.56	-	11.16	-	17.06	-
Single Contingency	#1	1.56	1.00	7.38	3.78	11.28	5.78
	#2	0.03	2.53	7.13	4.03	13.75	3.31
	#3	2.06	0.50	9.19	1.97	14.06	3.00
	#4	0.03	2.53	8.53	2.63	14.75	2.31
Double Contingency	#1	Div.	-	2.16	9.00	8.66	8.40
	#2	Div.	-	5.16	6.00	12.25	4.81
	#3	Div.	-	5.25	5.91	12.13	4.94
	#4	Div.	-	5.38	5.78	12.50	4.56

불필요한 부하차단을 줄이기 위해 실제로 사용할 수 있는 방법은 적절한 경보점과 비상점을 구하는 것이다. 중간부하에서는 발전력분배가 여유 있으나 최대 전송 최대 부하에서는 발전력분배나 부하분배의 여유가 너무 없기 때문에 경보점과 비상점을 결정하는데 너무 적은 여유를 가지기 쉽다. 그러므로 계통의 조건을 결정할 때 이 두 경우를 고려하여 본 논문에서는 경보점으로 9.0%(최대부하에 이중사고 #1)를 하고 비상점으로 4.03%(최대부하에 단일 사고 #2)로 하였다. 표2는 시스템 상황과 운전기준이다.

Table2 Operating criteria based on system conditions

표 2 시스템 기준에 따른 운전기준

계통 상태	동작여유 기준	운전자 조치사항
a. 중간부하에서 하나의 계획 점검 시	경보점 이상	운전자의 주의
b. 최대부하 시		
c. 중간부하에서 두 개의 계획 점검 시	비상점 이상	운전자의 조치
d. 최대부하에서 하나의 계획 점검		
e. 최대부하에서 최대 전력전송 시		

위의 기준에 의하여 경보점을 9.0%로 하고 비상점을 4.03%로 할 경우 다음의 가상 시나리오에 대하여 해석한다.

1). 중간부하 상태에서 계통에 하나의 계획된 점검이 있을 때(표2의 a의 경우) 동작여유는 경보점(9.0%)보다 크게 되어야 한다. 이는 표1에서 중간부하에 단일사고인 경우와 같으므로 모든 단일 사고에서도 만족한다. 중간부하에서 두 개의 계획된 점검이 있을 때(표2의 c)에 가장 나쁜 경우의 동작여유가 8.66%(이중사고 #1)로서 경보점에서 여유가 많다. 위의 두 경우에는 계통이 경보점과 비상점에 대한 여유가 많이 있으므로 발전력 재분배와 같은 계통을 조정할 여유가 있다.

2). 최대부하에서 동작여유는 경보점(9.00%)보다 크게 되어야 한다. 만일 동작여유가 경보점보다 적지만 비상점보다 크면 계통의 어떤 단일 사고(표1의 최대부하)에서도 안전할 수 있으므로 운전자의 주의만을 요한다. 이중사고(표2의 d)인 경우에는 표1의 이중사고#1 경우를 제외 한 나머지 경우는 계통이 정상적으로 운전된다. 만일 비상점보다 적다면 운전자는 비상점보다 큰 동작 여유가 있도록 적절한 조치를 해야한다.

3). 최대전력전송 최대부하인 경우(표2의 e)일 때 운전자는 동작여유를 2.56%에서 4.03%가 되도록 적절한 조치를 취해야된다. 이 경우는 최대부하의 경우에 어떤 사고로 최대 전력 전송이 된 경우이므로 계통에 적절한 조치를 해야한다. 이런 극단적인 조건에서도 계통이 정상적으로 운전 될 수 있도록 하기 위해서는 계통에 추가적인 비용이 많이 들게 된다.

### 2.3 동작여유 계산의 부정확성

동작여유의 계산은 계산 알고리즘, 계통의 구성과 데이터, 부하모델, 발전기의 무효전력 공급 능력 등의 여러 가지 요인들에 의하여 정확성이 부족하다. 특히 10분 후의 P-V곡선을 구하기 위하여 정확한 (10분)부하예측이 필요로 한데 이 또한 부정확하다. 계통의 모든 요소들이 동작여유 계산의 부정확성을 포함하고 있지만 이중에 부하 예측과 계통 구성 데이터 및 발전기 무효전력 제한의 부정확성이 가장 많은 영향을 미친다.

그리고 P-V곡선 계산 시 최대 부하점 근처에서 조류계산이 항상 수렴되지 않는 문제가 있지만 이는 실제적으로 동작여유를 감소시키는 효과를 가져오고 또한 부하모델도 동작여유 계산에 영향을 준다. 그러나 이와 같은 영향들은 모든 경우에 같은 조건으로 적용되므로 계통의 특성은 비슷하게 나타난다. 그러나 본 논문에서는 전압안정도의 동적인 특성을 다루지는 않았지만 부하모델의 영향은 많지 않았다.

계통 구성 데이터도 동작여유에 많은 영향을 미친다. 특히 병렬로 연결된 변압기의 탭 위치와 전압 조정 모션 선정이 잘못되면 변압기의 전력을 순환시키게 되어 동작여유 계산을 어렵게 한다. 또한 부정확한 발전기 무효전력 제한도 동작여유를 부정확하게 한다. 특히, 전압이 취약한 지역의 발전기인 경우는 더욱 그러하다. 그러나 위의 두 가지 문제점은 계통이 취약한 지역에 대한 데이터를 면밀히 검토하여 준비하면 부정확성을 줄일 수 있다.

### 2.4. 인텔리전트 릴레이

인텔리전트 릴레이는 비상시 운전자가 적절하게 조치하지 못하였을 때 최종으로 계통의 붕괴를 방지하는 장치이다. 이 릴레이는 계통의 붕괴를 방지하기 위하여 부하차단, 변압기의 탭 조정 및 무효전력 공급 등을 자동으로 조절하는 기능이 있다. 릴레이가 하는 부하차단은 운전자가 하는 부하차단과는 다르다. 운전자가 하는 부하 차단은 부하 차단 절차에 따라 차단 가능한 부하만을 차단할 수 있지만 릴레이가 차단하는 부하는 한 선로의 모든 부하를 차단하게 한다.

그러므로 인텔리전트 릴레이의 설치 장소와 정격이 중요하며, 릴레이가 어떤 정보를 가지고 언제 부하차단을 할 것인가가 중요하다. 그러나 전력회사마다 릴레이 정정 지침이 다르므로 정정하는 방법이 다르다. 이 릴레이가 사용할 수 있는 일반적인 데이터는 전압의 크기, 전압 변위, 유효전력 변화에 따른 전압 변동( $dV/dP$ ) 및 동작 여유 등이 있다. 저전압 릴레이는 장비 보호용으로 주로 사용되며 부하차단용으로 사용하는 경우는 드물다. 정격 전압과 실제 전압의 차로 나타내는 전압 변위는 전압이 얼마나 불안한가를 나타내는 보

조적인 요소로 사용되며 유효전력 변화에 따른 전압 변동은 릴레이가 전압의 불안정을 판정하는데 중요한 정보가 된다. 인텔리전트 릴레이에는 실제로 데이터의 측정 속도와 잡음 정도 고려 되어 할 사항이다. 더욱이 동작여유는 릴레이 동작에 중요한 정보이지만 이를 계산하는데 시간이 걸리는 단점이 있다.

인텔리전트 릴레이의 설치와 위치선정은 릴레이 정정에 비하면 간단하게 선정할 수 있다. 예를 들면 병원이나 군부대와 같은 중요한 부하를 제외한 전압이 취약한 모션을 선정하여 설치하면 된다.

부하차단을 얼마만큼 해야 계통이 붕괴되지 않고 정상적으로 운전되는가를 결정하는 것도 중요하다. 릴레이에 의하여 부하차단은 비상사태에서만 실행하지만 수용가의 부하가 가능한 최소로 차단되어야 한다. 부하차단의 크기와 위치 선정은 다음절에서 분석한다.

## 3. 전압 안정도

전압 안정도에 관한 결과는 인텔리전트 시스템의 실제와 관련된 몇 가지 전압 안정도 모의 시험을 통해 결과를 분석한다. 계통에 대한 설명은 표3과 같으며 최대전송 최대부하인 경우는 지역1의 910MW 용량의 발전기 두 대가 전력 공급을 중지한 것으로 가정하여 전력전송이 최대가 되도록 하였다. 전력은 지역1에서 지역2, 3으로 345kV 전력선을 주선로로 하고 161kV 선로는 보조선로로 했다. 그리고 대부분의 부하는 69kV, 23.9kV 및 13.8kV에 연결되어 있다.

Table 3 Generation, load and shunt compensation of three power flow models

표3 계통의 3부하 모델의 발전량, 부하, 및 무효전력 보상량

Area No	Peak Load with Max. transfer			Peak Load Model			Mid Load Model		
	Gen.	Load	Shunt	Gen.	Load	Shunt	Gen.	Load	Shunt
1	5352 +j1994	11567 +j3282	4132	7172 +j1466	11567 +j3282	4075	7132 +j871	10389 +j2948	3527
2	9707 +j2830	6312 +j1078	1696	8737 +j1564	6312 +j1078	1583	6311 +j648	5669 +968	1381
3	11233 +j1845	7350 +j1325	1665	10175 +j1164	7350 +j1325	1538	9932 +j1079	6601 +j1190	1471
4	122 +j18	452 +j79	70	122 +j21	452 +j79	69	122 +j19	406 +j71	70
Total	26413 +j6687	25681 +j5764	7553	26206 +j4215	25631 +j5764	7265	23497 +j2617	23065 +j5177	6449

### 3.1 동작여유와 계통 사고

동작 여유의 계산은 표3에서와 같이 3가지 부하 조건의 동작여유를 계산하였으며 130개 이상의 경우의 단일 사고와 이중 사고에 대하여 각각의 동작여유를 계산하여 분석하였다. 사고는 발전기 고장, 선로 고장, 변압기 고장의 단일 사고와 이들을 서로 조합한 이중고장을 가정하여 모의 시험하였다. 표4는 기본 모델의 경우와 고장이 가장 심한 단일고장과 이중 고장 8개의 결과를 각각 나타내었다. 최대 전력전송 최대부하의 경우는 실제로 20개 이중고장 중 14개의 경우가 계통의 전압이 회복되지 않았으며 이중 8개만 표4에 나타냈다.

**Table 4** Percentage operating margin and reduction of margin due to contingency

표4 각 사고의 경우 %동작여유와 동작여유 변화

Peak Load with Max. Transfer				Peak Load				Mid Load			
Cont. ing.	Outage	OM	ΔOM	Cont. ing.	Outage	OM	ΔOM	Cont. ing.	Outage	OM	ΔOM
Base Case				Base Case				Base Case			
		2.56	-			11.16	-			17.06	-
4	1G	0.03	2.53	5	1G	7.13	4.03	12	1T	11.31	5.75
3	1G	0.03	2.53	12	1T	7.38	3.78	5	1G	13.78	3.28
42	1L	0.75	1.81	4	1G	8.53	2.63	78	1L	14.09	2.97
41	1L	0.75	1.81	3	1G	9.00	2.16	4	1G	14.75	2.31
45	1L	0.78	1.78	78	1L	9.19	1.97	79	1L	14.88	2.19
1	1G	1.13	1.44	42	1L	9.44	1.72	3	1G	15.44	1.62
2	1G	1.44	1.13	41	1L	9.44	1.72	42	1L	15.59	1.47
37	1L	1.50	1.06	45	1L	9.63	1.53	41	1L	15.69	1.37
4	1L1G	Div.	-	8	2G	2.16	9.00	8	2G	8.66	8.40
5	1L1G	Div.	-	17	1L1G	5.16	6.00	18	2G	12.13	4.93
14	2L	Div.	-	16	1L1G	5.25	5.91	16	1L1G	12.13	4.93
15	2G	Div.	-	13	1L1G	5.38	5.78	17	1L1G	12.25	4.81
18	2G	Div.	-	18	2G	5.66	5.50	13	1L1G	12.50	4.56
20	1L1G	Div.	-	27	2L	6.00	5.16	27	2L	12.88	4.18
21	1L1G	Div.	-	15	2G	6.25	4.91	2	1L1G	13.00	4.06
22	1L1G	Div.	-	2	1L1G	6.28	4.88	22	1L1G	13.13	3.93

Note : 1G : 1 generator, 1L : 1 circuit of 345kV Line,  
 1T : 1 345/161kV transformer, 2G : 2 generator,  
 2L : 2 circuits of 345kV line,  
 1L1G : 1 Gen. and 1 circuit of 345kV line,  
 Div. : Non-convergent power flow case

표5는 전력 계통의 구성조건은 같고 다른 부하 모델에 대하여 동작여유를 %와 MW로 나타낸 것이다. 즉 발전기 용량이 1820MW가 고장인 경우는 동작여유가 2209MW만큼 감소했으며 최대부하인 경우가 중간 부하의 경우보다 1547MW만큼 크다. 이와 같은 차이는 발전기 분배와 무효전력 보상의 영향에 의하여 발생할 수 있다. 그러므로 같은 전력 계통에서 부하를 추가할 수 있는 능력은 발전기 분배와 무효전력 보상 장치를 적절히 조절하면서 각 지역의 부하와 발전량이 균형을 유지할 때 증가할 수 있다.

**Table 5** Operation margins and maximum operating point for base cases

표5 동작여유와 최대 운전량

Power Flow Model	System Load(MW)	OM(%)	OM(MW)	Max. Operating Point(MW)
Peal with Max. transfer	25,681	2.56	657	26,338
Peak Load	25,681	11.16	2,866	28,547
Mid Load	23,065	17.06	3,935	27,000

3.2 취약지역의 부하차단

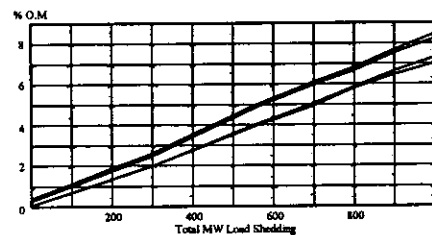
동작여유계산에서 지역1에 취약지역이 세 곳이 있었는데 취약지역의 부하를 줄이면 다른 지역의 부하를 줄이는 것보다 동작여유는 더 증가하였다. 그림 6은 동작여유의 영향을 분석하기 위하여 다음의 두 가지 부하 차단 방법을 적용하고 대표적인 4가지 고장인 경우의 동작여유를 나타내었다.

A 방법 - 가장 취약한 지역의 3개 모선의 부하를 차단하는 방법

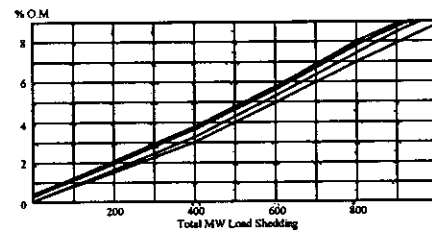
B 방법 - 방법 A에 추가하여 그 다음으로 취약한 모선 4개의 부하를 차단하는 방법.

표6은 각 부하 모델에 평균 변화 범위와 100MW 부하차단마다 동작여유의 변화량을 나타낸 것으로 적은 값일수록 고장 정도가 심하다는 것을 나타낸다. 예를 들면 그림 6의 (e)의 경우 100MW 부하차단에 0.90%(208MW)여유를 나타낼 때 동작여유의 변화가 가장 크다

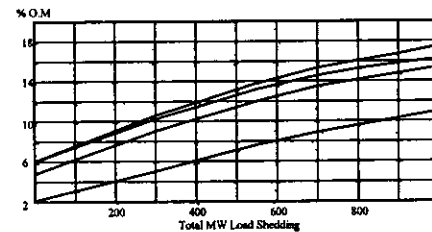
표6에서 B방법이 같은 량의 부하 차단에서 더 큰 동작여유를 가져 더 효과적인 방법이다. 이는 그림6에서도 (a)(c)(e) 보다 (b)(d)(f)가 같은 량의 부하를 차단할 경우 더 큰 동작여유를 보여주고 있다. 그리고 같은 량의 부하 차단이 증가됨에 따라 동작여유의 증가폭이 감소하고 있다. 취약지역의 부하차단을 하면 할수록 취약지역은 전압 안정도가 호전되며 부하차단의 효과가 점점 감소하게 되는 것이다. 그러므로 그림6의 (b)(d)(f)에서와 같이 동작여유의 증가가 선형적으로 변화하고 있으므로 B방법이 더 효과적이다.



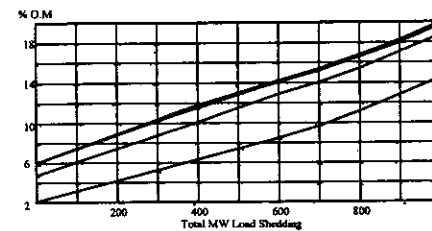
(a) Peak with Max. Transfer, Scheme A



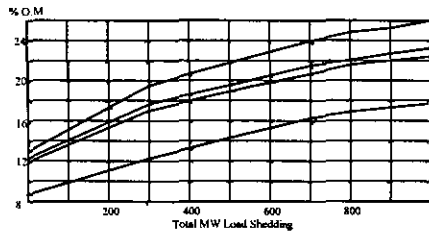
(b) Peak with Max. Transfer, Scheme B



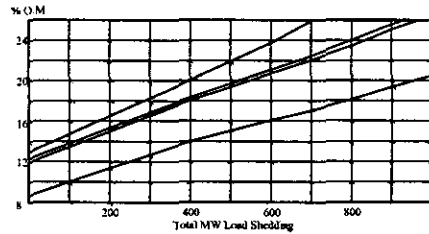
(c) Peak Load, Scheme A



(d) Peak Load, Scheme B



(e) Mid Load, Scheme A



(f) Mid Load, Scheme B

Fig. 6 Effectiveness of load shedding of selected contingencies

그림6 각 사고의 경우의 부하차단에 다른 동작여유 변화

Table 6 Average effectiveness of load shedding for selected contingencies

표6 각 사고의 경우 부하차단에 따른 평균 변화율

Power Flow Model	System Load [MW]	Effectiveness of Scheme A load Shed.		Effectiveness of Scheme B load Shed.	
		[%/100MW L.S.]	[MW/100M W L.S.]	[%/100MW L.S.]	[MW/100 MW L.S.]
Peak/wMax. trans	25,681	0.68 - 0.80	175 - 205	0.89 - 0.99	229 - 254
Peak Load	25,681	0.85 - 1.13	218 - 290	1.09 - 1.29	280 - 331
Mid Load	23,065	0.90 - 1.33	208 - 307	1.15 - 1.47	265 - 339

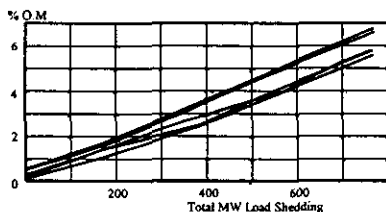
### 3.3. 전력 공급 중단 가능한 부하차단

전력공급 중단이 가능한 부하차단은 전력회사와 수용가 사이의 협의로 결정되지만 여기서는 임의로 17개 모선을 선정하였다. 이와 같은 부하차단은 수용가의 손실을 최소화할 수 있지만 3개의 부하만이 국부 취약지역에 있으므로 부하차단의 효과는 적었다. 다음의 두 방법으로 부하차단을 실시하여 계통의 특성을 분석하였다.

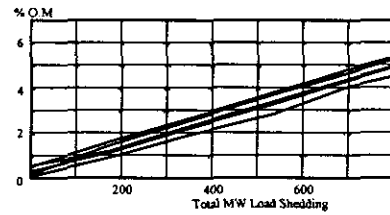
방법 C - 영향이 큰 모선 7개 부하차단

방법 D - 영향이 적은 7개 부하차단

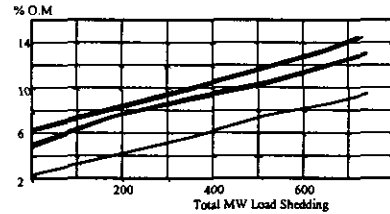
C법에는 7개 부하차단 모선 중 5개가 취약지역에 있고 D법에는 2개의 모선만이 취약지역에 있으므로 그림 7과 표7에와 같이 C법이 D법보다 영향이 크게 나타나고 있다.



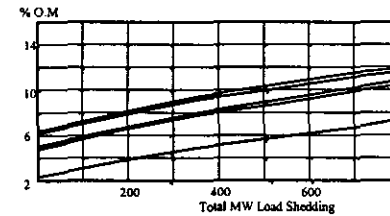
(a) Peak with Max. Transfer, Scheme C



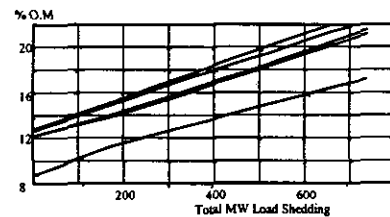
(b) Peak with Max. Transfer, Scheme D



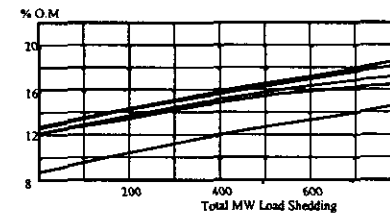
(c) Peak Load, Scheme C



(d) Peak Load, Scheme D



(e) Mid Load, Scheme C



(f) Mid Load, Scheme D

Figure 7 Effectiveness of load shedding for selected contingencies

그림7 각 사고의 경우의 부하차단에 다른 동작여유 변화

Table 7 Average effectiveness of load shedding for selected contingencies

표7 각 사고의 경우 부하차단에 따른 평균 변화율

Power Flow Model	System Load [MW]	Effectiveness of Scheme C load Shed.		Effectiveness of Scheme D load Shed.	
		[%/100MW L.S.]	[MW/100M W L.S.]	[%/100MW L.S.]	[MW/100 MW L.S.]
Peak/wMax. trans	25,681	0.79 - 0.85	203 - 218	0.53 - 0.60	136 - 154
Peak Load	25,681	0.90 - 1.10	231 - 282	0.60 - 0.63	154 - 162
Mid Load	23,065	1.10 - 1.47	254 - 339	0.58 - 0.66	134 - 152

위 방법을 같은 조건에서 비교하기 위하여 최대 전력전송 최대부하인 경우 동작여유를 비상점인 4.03%를 유지하기 위하여 필요한 부하 차단량을 비교하였다. 예를 들면 이 경우 1.47%(4.03-2.56)의 동작여유를 증가시켜야만 한다. A방법은 100MW당 0.68에서 0.80까지의 비율로 동작여유가 변화하므로 4.03%의 동작여유를 유지하기 위하여 가장 나쁜 조건으로 계산하면 216MW (1.47/0.68\*100)의 부하차단이 필요하며 가장 좋은 조건으로 계산하면 184MW의 부하차단을 필요로 한다. 표8은 비상점 동작여유를 유지하기 위한 네 가지 방법의 부하 차단량을 계산한 것이다.

Table 8 Required MW load shedding to improve operating margin from 2.56% to 4.03%

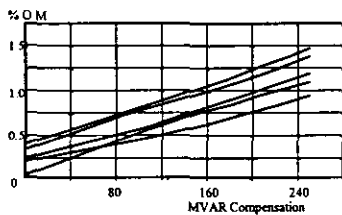
표8 동작여유를 2.56%에서 4.03%로 증가하기 위한 부하 차단량

Load shedding Scheme	Effectiveness [%/100MW L.S]	Required MW Load Shedding	
		Most Conservative Estimation	Less conservative Estimation
A	0.68 - 0.80	216	184
B	0.89 - 0.99	165	149
C	0.79 - 0.85	186	173
D	0.53 - 0.60	277	245

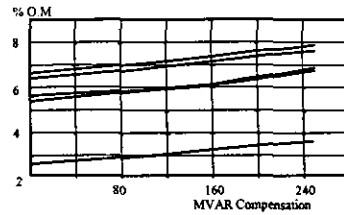
적은 량의 부하차단은 수용가의 피해를 줄이고 전력회사의 수익을 증가시킬 수 있으므로 가능한 부하 차단량을 최소화 해야한다. 그러므로 B 방법에서 전력회사는 165MW를 부하차단 해야하며 이를 위하여 전력회사는 취약지역에서 더 많은 수용가의 부하차단을 할 수 있는 방법을 강구해야 계통의 최대동작여유를 확보할 수 있다.

3.4. 병렬 보상기

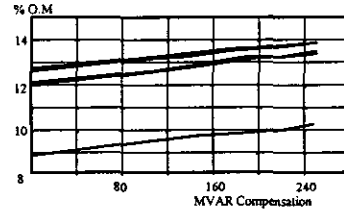
대부분의 경우 무효전력 보상으로 동작 여유가 증가될 수 있으며 이를 위한 무효전력 보상기로는 동기 조상기와 SVC와 같은 동적인 특성을 가진 장치가 가장 효과적이다. 보상기의 위치 선정도 동작여유를 증가시키는데 중요하지만 본 논문의 범위를 벗어나므로 다루지 않았다. 취약지역에 임의의 161kV 두 개의 모선을 선정하여 36.6MVAR와 84MVAR를 설치하여 같은 부하 모델에서 동작여유 상태를 비교 분석하였다. 그림8은 세 가지 부하모델에서 동작여유의 증가를 보여주고 있는데 동작여유가 부하차단의 경우보다 개선되지 않았지만 조금 개선되었다. 표9는 100MVAR당 동작여유의 증가폭을 나타낸 것이다.



(a) Peak with Max. Transfer



(b) Peak Load



(c) Mid Load

Fig. 8 Effectiveness of additional shunt compensation 그림 8 무효전력 보상량에 따른 동작여유 변화

Table 9. Average effectiveness of additional shunt compensation

표 9 무효전력 보상량에 따른 동작여유 변화

Power Flow Model	System Load [MW]	Effectiveness of additional shunt Compensation	
		[%/100MVar Compensation]	[MW/100MVar Compensation]
Peak W/max. trans	25681	0.46 - 0.50	118 - 124
Peak Load	25681	0.30 - 0.46	77 - 118
Mid Load	23065	0.53 - 0.55	122 - 127

Table 10 Improvement of OM when weak buses in weak areas were of unity power factor

표10 취약지역 모선의 역률을 1로 하였을 때 동작여유 증가

Power Model	Load	MVAR Added	Contingency	ΔOM(%)	ΔOM(MW)
Peak Load with Max. Tran	25,681	206	4B	1.53	393
			5B	1.15	295
			26	1.31	336
			3	1.47	378
			10	1.50	385
			11	1.43	367
Peak Load	25,681	206	8	2.31	593
			17	3.18	817
			16	3.16	812
			13	3.25	835
			27	3.50	899
			15	3.18	817
Mid Load	23,065	100	8	2.94	678
			16	4.18	964
			18	4.12	950
			17	4.19	966
			13	4.31	994
			27	5.41	1,248

표8과 같은 방법으로 계산하면 부하차단을 하지 않고서 320-294MVAR의 보상기를 설치해야 동작여유를 4.03%만큼 확보할 수 있다. 이는 표9에서의 데이터를 가지고 계산한 것

이고 보상기를 최적의 위치에 설치한다면 보상기의 용량을 적게 하여도 같은 동작여유를 확보할 수 있을 것이다.

다음은 부하의 역률이 개선될 때 동작여유의 변화를 분석한 것이다. 표10은 계통에서 다른 부하의 역률은 변화하지 않고 취약지역의 18개 모선 부하만 역률을 1로 할 때 6가지 사고인 경우의 동작여유를 나타낸 것이다. 각 부하의 역률은 무효전력 용량을 추가하여 역률을 개선하였으며 그 용량은 최대부하인 경우가 206MVAR이고 중간 부하인 경우가 100MVAR이다.

표10에서 5B, 26 및 11을 제외하고는 1.47(경보점 4.03%를 유지하기 위하여 요구하는 원래 여유)보다 크게 나타났다. 그러므로 부하의 역률개선이 전압 안정도 개선에 많은 기여를 하는 것으로 나타났다.

#### 4. 결론 및 검토

본 논문에서는 전압 붕괴 방지를 위한 인텔리전트 시스템의 구성과 기능을 제시했다. 이 시스템은 계통의 상태를 파악하여 운전자가 계통의 전압 불안정에 적절히 대처할 수 있는 정보를 얻게 하며 운전자가 미처 대처하지 못한 사고에 대한 계통의 보호장치로 인텔리전트 릴레이가 있다.

일반적으로 계통이 불안정점으로 이동할 때는 계통의 예비율은 거의 없으므로 운전자가 대처할 수 있는 조치인 부하차단의 영향을 분석하였다. 그 결과에서 계통의 전압 안정도를 증진하기 위하여(동작 여유 증가) 부하차단의 효과는 부하 차단 위치와 방법에 따라 많은 변화가 있었다. 효과적인 부하차단 방법으로는 전압이 불안정한 지역(취약지역)의 부하를 차단하고 한곳보다는 여러 곳을 차단하는 것이 계통의 동작여유를 더 많이 증가되었다. 또한 적절한 무효 전력원을 설치하여도 동작여유가 증가되므로 적은 부하 차단으로도 같은 동작여유를 확보할 수 있는 것으로 나타났다. 그리고 부하 역률을 개선하면 동작여유가 증가되었다.

인텔리전트 릴레이는 설치하는 장소와 릴레이 정정을 어떻게 할 것인가 또한 중요하며, 부적절한 정정은 계통을 더욱 불안정하게 한다. 여기서 릴레이 설치 위치 선정하는 한 방법으로는 부하변화에 동작 여유의 변화가 큰 곳을 선정하면 되고, 정정에 필요한 데이터로 전압의 크기, 전압의 변화,  $dV/dP$  및 동작여유를 제시했다.

#### 감사의 글

본 논문은 순천대학교 공과대학 학술재단의 지원에 의하여 수행되었음

#### 참 고 문 헌

[1] W.R. Lachs, D. Sutanto, "Different Types of Voltage Instability", IEEE trans. on Power Systems, vol.9, No.2, May 1994  
 [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, New York, 1994  
 [3] P. Kessel, H. Glavitsch, "Estimating the Voltage Stability of Power System", IEEE Trans. on Power

Delivery, vol. 1, no.3, July 1986  
 [4] Y. Tamura, H. Mori, S. Iwamoto, "Relationship between Voltage Instability and Multiple Load flow solutions in electric Power Systems", IEEE trans. on Power Apparatus and Systems, vol. 102, no.5, May 1983  
 [5] P.A. Lof, T. Smed, G. Andersson, D.J. Hill, "Fast calculation of a Voltage Stability Index", IEEE/PES 1991 winter Meeting, New York  
 [6] R.S. Tare, P.R. Bijwe, "A New Index for Voltage Stability Monitoring and Enhancement", Electrical Power & Energy Systems, Vol.20, No.5, 1998  
 [7] Kenji Iba, Hiroshi Suzuki, Ichiichi Suzuki, Katsuhiko Z. Suzuki, "Practical Reactive Power Allocation/Operation Planning Using Successive Linear Programming", IEEE trans. on Power System, vol.3, no.2, May 1988  
 [8] Abbas M. Abed, "WSCC Voltage Stability Criteria, UnderVoltage Load Shedding Strategy, and Reactive Power Reserve Monitoring Methodology", IEEE Conference 1999  
 [9] Carson W. Taylor, "Concepts of Undervoltage Load Shedding for Voltage Stability", IEEE trans. on Power Delivery, vol.7, no.2, April 1992

#### 저 자 소 개



김재현 (金在顯)  
 1956년 1월 25일 생. 1977년 홍익대 전기공학과 졸업. 1989년 University of Texas at Arlington 졸업(석사). 1993년 동대 졸업(박사). 현재 국립 순천대 정보통신공학부 조교수  
 Tel : 061-750-3545, Fax : 061-752-9841  
 E-mail : jhg@sunchon.ac.kr