나타내고 있는 것으로 습분 보호책을 강화 할수록 결함의 발생, 성장 및 파괴 확률이 현저하게 감소함을 알 수 있다.

3) Effect of Ring Section

표 5는 Ring Section별 결함의 발생, 성장 및 파괴 확률을 보여주고 있다. Retaining Ring의 기하학적 형상에 의해 형상별 응력 분포를 달리하게 된다. 응력 집중이 높은 구역에서 결함의 발생, 성장 및 파괴 확률이 높음을 알 수 있었다.

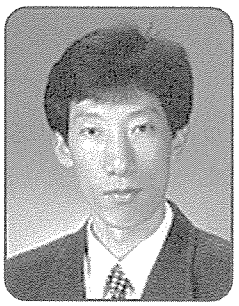
표 5. RRing-Life Results(Ring Section)

Effect of Ring Section				
		P_{init}	P_{griw}	$P_{failure}$
End Ring Sections New York	A-A	10%	0%	0%
	B-B	4%	0%	0%
	C-C	5%	0%	0%
Rotor End Sections	*D-D	*23%	* 4%	* 3%
	E-E	13%	4%	2%
	F-F	16%	10%	5%
	G-G	18%	0%	0%

* Base Case

전력계통 안정도 확보를 위한 발전기 무효전력 성능시험

A capability test of generator reactive power for stability guarantee of electric power transmission



한전전력연구원
수화력발전연구소 I&C그룹
선임 연구원 이 주 현
Tel : (042) 865-5386

1. 서 언

우리나라의 전력계통은 전력수요의 증가에 따라 전력공급이 증대되면서 전력계통의 수송밀도가 급속하게 증가되고 있으며, 이에 따라 계통 규모가 과거에 비해 크게 확장되었고 수도권을 중심으로 송전선로의 루프화가 진행되고 있는 형편이다. 그 결과 과거에는 가능성이 비교적 낮았던 미국 등 구미 선진국형 전압안정도 문제의 출현 가능성이 점차 높아지고 있다.

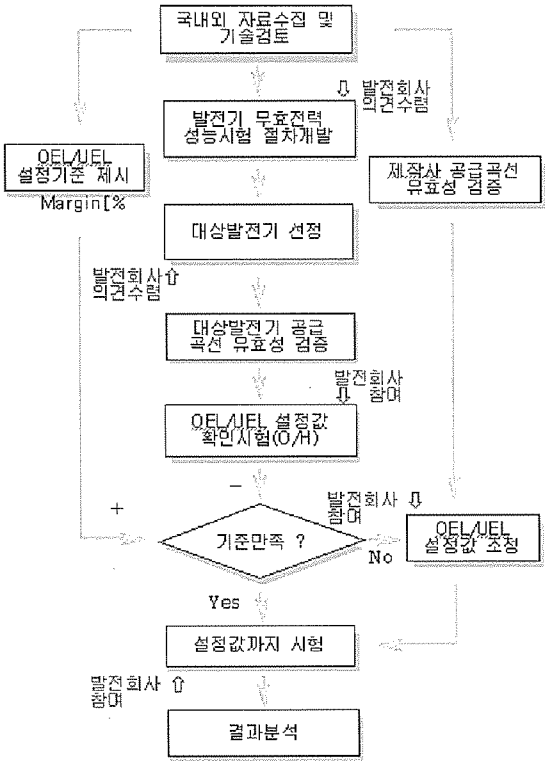
2003년 8월에 발생한 북미 광역정전과 관련하여 정부(전기위원회)는 대통령 지시사항에 따라 국내 전력계통의 광역정전을 대비하여 분야별로 점검사항을 집중 검토 중에 있으며, "발전기 무효전력 공급능력 시험"을 무효전력 및 전압제어 분야의 주요개선 추진항목으로 선정하였다.

이에 따라 전압안정도의 일차적 책무를 지고 있는 발전기의 무효전력 공급 가능 량을 정확히 파악하기 위하여 무효전력 성능시험 절차서 개발 및 실제의 운전 중인 발전기를 대상으로 무효전력의 성능시험이 필요한 실정이다. 발전기 무효전력 공급량 파악을 통해 전압불안정 문제에 대한 무효전력 수급측면의 대책을 강구하여 지역적 혹은 광역정전과 같은 문제를 사전에 대처할 필요가 있다. 본 고에서는 전력계통의 안정도 확보를 위한 무효전력 성능시험의 추진내용과 진상/지상 무효전력의 제한기능 및 실제 운전 중인 발전소의 발전기를 대상으로 성능시험을 통한 무효전력의 공급가능 능력을 검증한 내용을 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1. 발전기 무효전력 성능시험의 개요

발전기 무효전력 성능시험의 주요내용으로는 우선 대상발전기를 선정하고, 발전기 무효전력 실제 공급능력 측정을 위한 성능시험 표준절차서 개발 및 운전 중인 발전기를 대상으로 성능시험을 수행하여 제작사에서 제시한 발전기 공급능력의 유효성 검증과 실제 공급 가능한 무효전력량을 확인하는데 목적이 있다. 아래의 [그림 1]은 무효전력 성능시험의 개요도를 나타낸다.



[그림 1] 무효전력 성능시험 개요도

국내외에서 실시하고 있는 발전기 무효전력 성능시험의 기술검토와 다수의 발전소 중에서 먼저 대상발전기를 선정하였다. 대상발전기는 자동전압조정장치(AVR)와 여자기 형식, 보조서비스 보상시행 시 계약대상 후보 발전기, 발전기 예방정비기간, 발전원 등을 고려하여 발전사업자와 사전협의 과정을 거쳐 [표 1]에 나타낸 것과 같이 8개의 대상발전기를 선정하였다. 제작사가 제시한 발전기 공급곡선이 유효하다는 조건으로 성능시험을 수행하며, 발전기 성능저하에 따라 무효전력 공급능력에 변화를 미치는 요소 등을 검토하여 제작사가 제시한 발전기 공급곡선 사용에 대한 유효성을 검증하였다. 시험에 앞서 발전기 무효전력 성능시험의 세부 절차 서를 개발하고, 이 절차서에 따라 선정된 대상발전기에 대하여 발전소 정지 중에 과 여자(OEL)와 저 여자(UEL) 제한 설정값을 시험을 통해 확인하였다. 시험 대상발전기의 제작사가 제시한 무효전력 공급 가능곡선과 해당 발전기의 성능시험 등을 통해 취득한 파라미터를 이용하여 재작성한 무효전력 공급능력 곡선을 상호 비교 검토함으로써 설정값의 적정성과 실제 계통과 연계되어 운전 중인 발전기 무효전력의 조정을 통해 설정된 값들의 유효성을 검증하였다.

2.2 성능시험의 내용 및 절차

발전기 무효전력 성능시험은 크게 정지 중(Off_Line) 시험과 운전 중(On_Line) 시험으로 구분하며 정지 중의 시험은 발전기 제작 사에서 제공한 공급능력 상의 무효전력 공급능력 제한치의 확인 및 시험을 실시하고, 실제 발전기 운전 중 시험을 통해 제한 치와 공급능력을 확인 시험하게 된다. 정지 중

[표 1] 무효전력 성능시험 대상발전기

대상발전기	여자기형식	제작사	연 료	운 전	제 어	기 간	발 전 사
고리 1호기	직 접	두 산	원자력	MCR	디지털	05.03/08 ~ 04/26	한수원
하동 3호기	직 접	GE	석탄	MCR	디지털	05.05/10 ~ 07/20	남 부
서인천3호기	직 접	GE	가스	Gov. Free	아날로그	05.07/01 ~ 09/15	서 부
울산 5호기	직 접	전력연구원	유류	Gov. Free	디지털	05.09/01 ~ 10/30	동 서
무주 1호기	직 접	GEC	수력	비상대기	아날로그	06.02/10 ~ 04/30	남 동
평택 3호기	간 접	동일전자	유류	Gov. Free	아날로그	06.02/28 ~ 04/18	서 부
당진 3호기	직 접	GE	석탄	MCR	디지털	06.03/25 ~ 05/23	동 서
서천 2호기	직 접	맥스파워	석탄	Gov. Free	디지털	06.09/25 ~ 10/25	중 부

의 무효전력 성능시험의 방법으로는 실제 발전기 전압과 전류의 신호를 모의 전원 발생기를 연결하여 전압과 전류의 크기, 전압 대비 전류의 위상차, 전압 주파수 등의 신호의 인가하고 변화 시켜서 진상 및 지상 무효전력의 제한 치들을 확인하고 시험하게 된다. 정지 중의 무효전력 성능시험의 구체적인 시험내용과 절차들을 요약하면 다음과 같다.

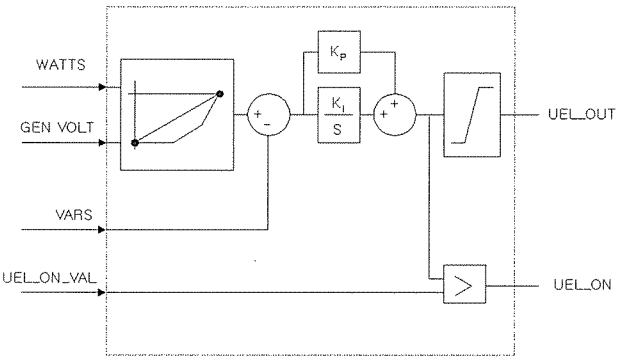
- ㅇ 발전기 전압/전류 신호 모의 인가 준비
- ㅇ 무효전력 검출회로 정 특성 시험
- ㅇ 저 여자(UEL)/과 여자(OEL) 특성 곡선 파라미터 산출
- ㅇ 저 여자(UEL)/과 여자(OEL) 제어기 동작 특성 시험
- ㅇ 저 여자(UEL)/과 여자(OEL) 제어정수조정 저항 또는 Tuning변수 확인
- ㅇ 발전소 무효/유효전력 Calibration 계획 수립
- ㅇ 저 여자(UEL)/과 여자(OEL) 경보회로 동작시험

운전 중 시험은 중 부하 시간대에 지상 무효전력 시험과 경 부하 시험대에 진상 무효전력 시험을 수행하며, 발전기 출력을 100%, 75%, 50%, 25%의 부하대에서 발전기 전압의 조정을 통해 무효전력의 제한 설정 치와 공급능력을 확인하게 된다. 운전 중 시험에서 고려되어야 할 것은 시험 시 유효 및 무효출력 변동 범위의 최소화를 위해 자동발전제어(AGC) 및 조속기(Gov.) 운전을 일시 정지하고, 인근 모선전압(154/345kV 모선)은 기준전압 범위 내에서 운전되도록 조상설비를 사전에 조정하며, 인근 모선에 과전압 혹은 저 전압이 발생하지 않는 범위와 소내 부하전원의 허용 운전 범위 내에서 시험을 실시하였다. 발전기 운전 중에는 현실적으로 여러 운전제약 조건(소내 전압 강하, 안정도 저하, 무효전력 과다) 때문에 Actual Test가 불가능 할 경우 설정 값을 평행 이동하여 제한기의 제어 응답 동특성을 확인하고 검증하였다.

2.3 진상 무효전력 제한 (UEL:Under Excitation Limitter)

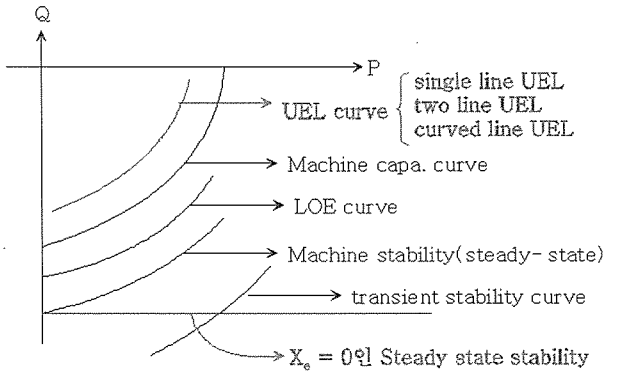
진상 무효전력 제한의 목적은 발전기 철심 단부의 과열방지와 전기자 반작용의 증자작용으로 인한 발전기 안정도 저하 방지이다. 진상 역율(부족 여자상태)에서는 계자전류의 크기가 작기 때문에 유지환(Retaining ring)은 포화되지 않은 상태이고 따라서 고정자 권선 단부의 누설 자속이 커지게 된다. 뿐만 아니라 부족여자 상태에서는 고정자 권선의 전류에 의하여 발생한 자속이 계자전류에 의한 자속과 합쳐지게 되므로 고정자 단부가 국부적으로 과열이 되어 문제가 된다.

아래의 [그림 2]는 제어기에 들어있는 부족여자 제한기의 블록 도를 나타내는데 진상 무효전력 제한에 사용하는 부족여자 제한기는 발전기의 유효 전력을 단자전압의 자승으로 나누어 일반화하고 이 값을 단위법으로 일반화된 부족 여자 제한치를 갖고 있는 함수 발생기를 거쳐 부족여자제한기의 설정값이 된다. 비례/적분기는 자동전압조절기가 운전 중이고 발전기 주 차단기가 닫혀 있을 경우에만 활성화되며 궤환된 무효전력과 설정 값을 비교하여 편차를 만들어 출력을 발생시킨다. 비례/적분기의 출력은 상한/하한 제한기를 통과하여 자동 전압 조정기의 설정 값에 더해지게 되어 발전기의 무효전력이 설정 값에 비하여 작을 경우에는 자동으로 단자전압을 상승시켜 부족여자 제한치를 넘어 운전되는 것을 방지한다.

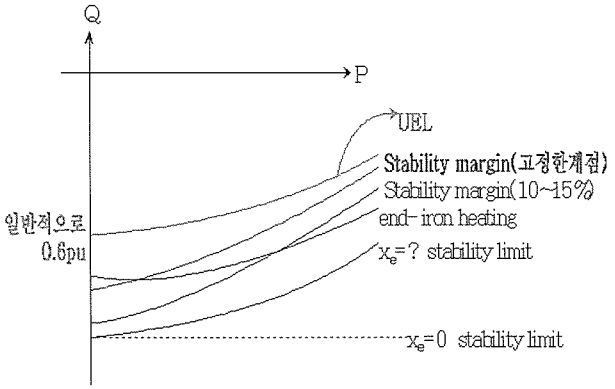


[그림 2] 부족여자 제한기 블록도

[그림 3]은 P-Q평면상에서 발전기 제어시스템의 진상운전영역에서 부족여자 운전 및 보호한계를 나타낸 그림이다. 정태안정도와 과도안정도 사이에 동태안정도가 있게 되며, 정태안정도보다 거의 비슷하게 안쪽으로 경보용 LOE(Loss of Excitation) Curve가 있다. [그림 4]는 부족여자(UEL) 보호선을 어떻게 결정하는 가를 보여주는 그림이며, 그림에서 보듯이 정태안정 한계에 10-15% 한계를 두는 안정도 여유선과 기계적인 한계선(End-iron heating)을 고려하여 결정되게 된다.



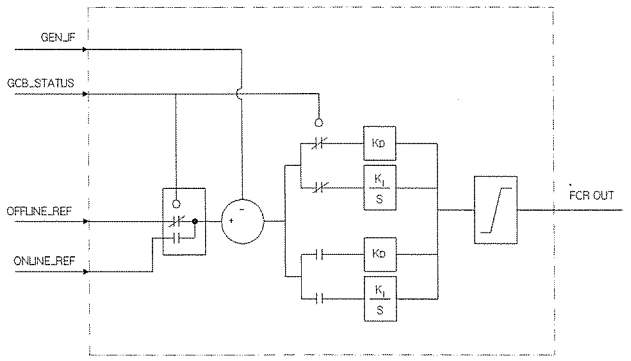
[그림 3] 부족여자 운전 및 보호한계



[그림 4] 부족여자(UEL) 결정 방법

2.4 지상 무효전력 제한 (OEL:Over Excitation Limitter)

지상 무효전력 제한기는 비례/적분기로 구성된 제어기로 과전류 제한기로 동작하며 발전기가 계통병해(Off-Line)된 상태에서는 발전기와 발전기에 연결된 각 변압기에 과자속(Over-Flux)이 발생되는 것을 방지하고, 계통병입(On-Line)된 상태에서는 과열에 의한 계자 권선의 손상을 방지하는 것을 목적으로 한다. 과 여자 제한기는 계통 병입 여부에 따라 두 개의 설정값을 가지며, 계자전류를 일정값 이하가 되도록 상황에 따라 설정값 중 적당한 값을 선택하여 적용하게 된다. 과 여자 제한기가 동작되면 자동전압 조절기 또는 수동전압 조절기의 설정 값을 더 이상 상승 시키는 것이 불가능해져 과 여자 되는 것을 방지하게 된다. [그림 5]는 과 여자 제한기의 블럭도를 나타낸다.



[그림 5] 과 여자 제한기 블록도

2.5 무효전력 성능시험 사례 및 결과[1]_당진화력 3호기

무효전력 성능시험은 8개의 발전기 대상으로 시행하게 되는데, 당진화력 3호기의 성능 시험의 주요 내용으로는 시험절차에 따른 시험의 내용과 사전에 계통 시뮬레이션을 통한 모의시험 내용, 정지 및 운전 중 시험의 결과를 기술하였다.

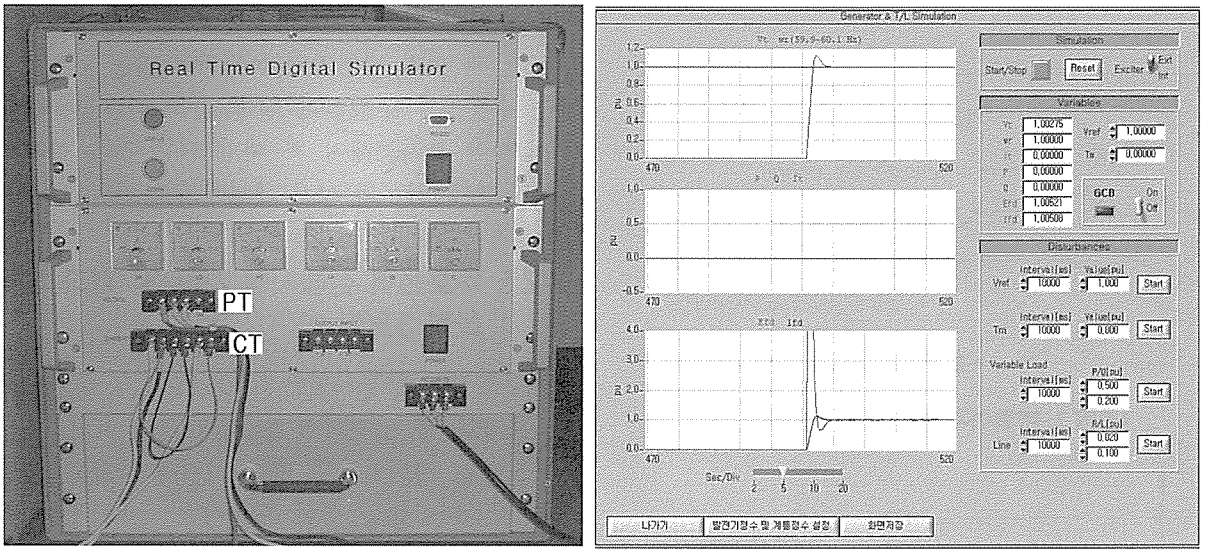
□ 당진화력 3호기 발전기 및 여자기 사양

시험 대상발전기인 당진화력 3호기 발전기 및 여자기의 사양은 아래와 같다.

- ○ 발전기 정격 출력 : 612[MVA]
- ○ 발전기 단자 전압 : 22[kV]
- ○ 정격 계자 전류(IFFL) : 4353[A]
- ○ 정격 계자 전압(VFFL) : 463.8[V]
- ○ 발전기 전압 비(PT Ratio) : 22000/120[V]
- ○ 발전기 전류 비(CT Ratio) : 22000/5[A]
- ○ 여자변압기 전압 비(PPT Ratio) : 22000/575[V]

□ 정지 중 성능시험

무효전력의 성능시험은 크게 정지 중에 진상/지상 무효전력의 제한 설정값 시험과 운전 중에 무효전력의 공급 가능능력을 확인하는 시험을 수행하였다. 발전기 전압과 전류신호에 발전기 정지 중에도 운전상태를 모의할 수 있는 별도의 시뮬레이터를 연결하여 전압 및 전류크기, 전압 대비 전류위상차와 주파수 등의 신호를 인가하여 진상 무효전력 제한곡선(부족여자 제한)을 확인하였다. 또한 직류전압 전류 발생기를 이용하여 계자전류에 해당하는 신호를 공급하는 방법으로 시험을 수행하여 지상 무효전력 제한(과 여자제한) 곡선을 확인하였다. 대상발전소인 당진화력 3호기 발전기의 과 여자 제한은 정격 계자전류(4353A)의 1.02PU(4440A)일 때 제한동작을 하고, 1.12PU(4875A)일 때 120초 후에 정지(Trip) 동작이 이루어졌으며, 1.4PU(6094A)일 때 바로 정지(Trip) 동작이 이루어졌다. 다음의 [그림 6]은 모의시험용 시뮬레이터와 시뮬레이터를 이용한 시험내용을 보여주고 있다.



[그림 6] 모의시험용 시뮬레이터 및 시험내용

[표 2] 정지 중 무효전력 성능시험 결과

	유효전력[MW]	무효전력[Mvar]	능력곡선	Margin
UEL 설정치	6	-194	-290	33%
	187	-200	-300	33%
	370	-173	-280	38%
	506	-128	-225	43%
	545	-89	-210	58%
	605	-22	-130	83%
OEL 설정치 (AFFL의102%)	0	452.9	450	-1%
	372.7	380.2	375	-1%
	550.8	266.8	267	0%
	599.8	121.8	121.8	0%
	612	0	0	0%

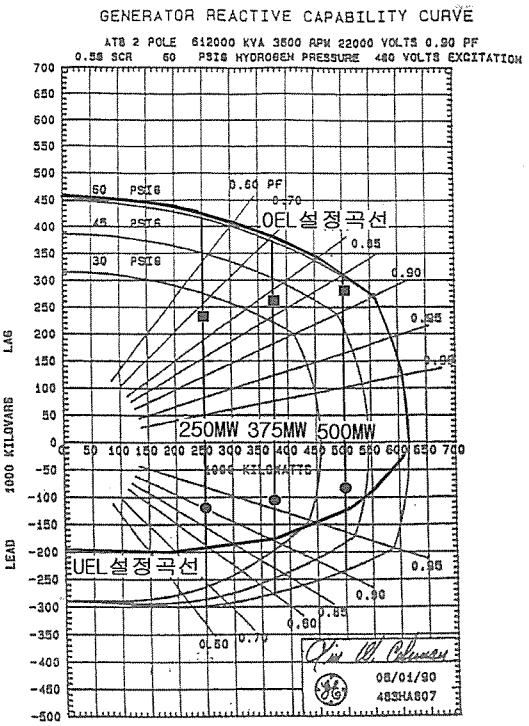
□ 운전 중 성능시험

운전 중 무효전력 성능시험을 수행하기 위해서는 시험 당일 계통 수요를 시뮬레이션 할 수 있는 PSS-E 프로그램을 통해 인근 발전기를 포함한 계통전력의 수요와 대상 발전기의 특성을 분석하여 시험하고자 하는 각 출력대별 무효전력의 공급 및 소비 능력을 모의하고 검토하였다. 이 결과를 가지고 운전 중에 발전기의 무효전력과 발전기 전압의 조정범위를 결정하고, 원활한 성능시험을 위해 인근 발전기들의 발전기 무효전력의 조정의 협조를 필요로 하였으며, 실 계통에서 시험을 수행하여 발전소 운전 상 발전소 소내 모선전압 등 운전 범위의 한계로 인해 제약은 있었으나 발전기 능력곡선과 진상/지상 무효전력의 각 제한 곡선 안에서 안정적으로 운전되는 것을 확인 할 수 있었다.

운전 중 무효전력의 성능시험의 결과로는 정격부하의 100%(500MW), 75%(375MW), 50%(250MW)에서 시험을 시행하여 무효전력의 최대 운전 범위는 지상무효전력 +280MVar(500MW, 22.72kV), 진상 무효전력 -188Mvar (250MW, 20.85kV)이었으며, 발전기 계자전류의 최대 상승 값은 500MW 부하에서 지상 무효전력 시험 시 4361A이었다. 아래의 [표 2]는 대상발전기의 운전 중 지상/진상 무효전력의 성능시험 결과 데이터를 나타내며, [그림 7]은 발전기 모의 시뮬레이터를 이용하여 현재 설정되어 있는 진상/지상 무효전력의 제한 값들을 시험 및 확인한 후 운전 중에 시험한 결과를 제작사가 제시한 발전기 능력곡선

[표 3] 계통 모의시험 결과

출력	발전기	초기 상태				모의 결과			
		무효전력			주요 모선전압	무효전력			주요 모선전압
		무효전력	단자전압		당진화력	무효전력	단자전압		당진화력
		(MVAR)	(PU)	(kV)	765kV	(MVAR)	(PU)	(kV)	765kV
500 (MW)	당진#1	183	1.00	22.00	764.6	179	1.00	22.00	779.5
	당진#2	183	1.00	22.00		179	1.00	22.00	
	당진#3	**135**	**1.00**	**22.00**		**300**	**1.05**	**23.10**	
	당진#4	138	1.00	22.00		98	0.99	21.78	
	당진#5	138	1.00	22.00		98	0.99	21.78	
	당진#6	137	1.00	22.00		97	0.99	21.78	
375 (MW)	당진#1	181	1.00	22.00	765.8	136	0.97	21.34	780.5
	당진#2	181	1.00	22.00		136	0.97	21.34	
	당진#3	**115**	**1.00**	**22.00**		**317**	**1.050**	**23.10**	
	당진#4	134	1.00	22.00		65	0.97	21.34	
	당진#5	134	1.00	22.00		65	0.97	21.34	
	당진#6	133	1.00	22.00		64	0.97	21.34	
250 (MW)	당진#1	179	1.00	22.00	766.5	134	0.97	21.34	781.2
	당진#2	179	1.00	22.00		134	0.97	21.34	
	당진#3	**99**	**1.00**	**22.00**		**302**	**1.05**	**23.10**	
	당진#4	130	1.00	22.00		61	0.97	21.34	
	당진#5	130	1.00	22.00		61	0.97	21.34	
	당진#6	129	1.00	22.00		60	0.97	21.34	



[그림 7] 발전기 능력곡선 상의 무효전력 제한설정 곡선

상에 도시하여 정상적으로 설정되어 동작하는 것을 보여주는 그림이다.

3. 결 론

대규모로 복잡화 되고 있는 전력계통의 안정도 확보를 위해 무효전력의 적정 수급계획 수립 등전력계통 전압안정도 향상을 위한 제반 계통 검토 시 기본 자료로 활용 및 향후 시행될 무효 전력 보상 방안 시행에 대비한 기본 자료로 활용될 예정이다. 발전기 무효전력 운전특성의 정확한 데이터 확보를 통해 효율적인 계통 운용 및 설비 이용율 향상에 기여하고, 발전기 무효전력 공급능력 확대 등 전력계통 및 계통 운영 보조서비스 운영 개선을 위한 기술 자료로 활용 가능할 것이며, 발전기 무효전력 시험분야의 표준화된 절차서를 개발함으로써, 한국전력공사 산하 전력그룹사 및 기타 전력생산자가 현재 운용중인 전체 발전기 여자시스템뿐만 아니라 향후 건설되는 발전소의 시운전과정까지 발전기 무효전력 성능시험 시 본 기술과 절차의 적용이 가능하여 전력계통의 안정도 향상과 신뢰도 확보를 위한 무효전력의 공급능력의 확보를 통해 대규모로 복잡화 되고있는 전력계통의 운용여유 확보와 계통 운용비용 절감 및 발전기 무효전력 운전특성의 정확한 데이터를 확보를 통해 효율적인 계통운용 및 설비 이용 율 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

[표 4] 운전 중 무효전력 성능시험 결과

구 분	출 력	발전기단자전압		무효 전력	유효 전력	소내모선 전압	계자 전압	계자 전류	비 고
		[p.u.]	[kV]	[Mvar]	[MW]	[kV]	[V]	[A]	
진상	100% 500[MW]	0.95	20.81	-81	501	6.59	250	2833	
	75% 375[MW]	0.95	20.86	-103	376	6.62	197	2247	
	50% 250[MW]	0.95	20.85	-118	256	6.62	149	1732	
지상	100% 500[MW]	1.03	22.72	280	497	7.23	401	4361	
	75% 375[MW]	1.03	22.7	265	375	7.19	354	3912	
	50% 250[MW]	1.03	22.63	239	254	7.18	313	3498	