

**전력계통 안정도 확보를 위한 발전기 무효전력 성능 시험(1)**

이주현\*, 임익현\*, 류호선\*, 신만수\*, 김준환\*\*  
 한전 전력연구원\*, 한국전력거래소\*\*

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

Lee Joo-hyun\*, Lim Ick-heon\*, Ryu Ho-seon\*, Shin Man-su, Kim Joon Hwan\*\*  
 KEPCO KEPRI\*, KPX\*\*

**Abstract** - 전력수요의 급속한 증가에 따라 우리나라 전력계통은 수송밀도가 증가되고 광역화되어 과거에는 가능성이 비교적 낮았던 미국 등 구미 선진국 형 전압안정도 문제의 출현의 가능성이 점차 높아지고 있다. 본 논문에서는 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.

**1. 서 론**

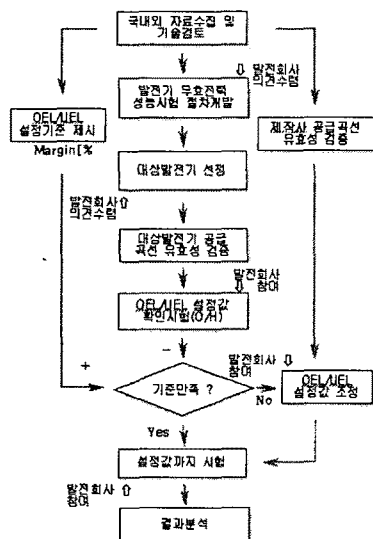
우리나라의 전력계통은 전력수요의 증가에 따라 전력공급이 증대되면서 전력계통의 수송밀도가 급속하게 증가되고 있으며, 이에 따라 계통 규모가 과거에 비해 크게 확장되었고 수도권을 중심으로 송전선로의 루프화가 진행되고 있는 형편이다. 그 결과 과거에는 가능성이 비교적 낮았던 미국 등 구미 선진국 형 전압안정도 문제의 출현의 가능성이 점차 높아지고 있다. 이에 대비하여 전압안정도의 일차적 책무를 지고 있는 발전기의 무효전력 공급 가능 량을 정확히 파악하기 위하여 무효전력 성능시험 절차서 개발 및 실제의 운전 중인 발전기를 대상으로 무효전력의 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 논문에서는 전력계통의 안정도 확보를 위한 무효전력 성능시험의 추진내용과 진상/지상 무효전력의 제한기능 및 실제 운전 중인 발전소의 발전기를 대상으로 성능시험을 통한 무효전력의 공급 가능 능력을 검증한 내용을 기술하고자 한다.

**2. 본 론**

**2.1 무효전력 성능시험 개요**

무효전력 성능시험의 내용은 대상발전기를 선정하고, 발전기 무효전력 공급능력의 확인을 위한 세부절차서 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.



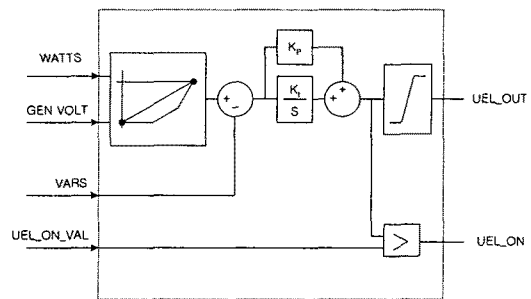
**<그림 1> 무효전력 성능시험 개요도**

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 8개의 대상발전기를 선정하였다. 제작사가 제시한 발전기 공급곡선이 유효하다는 조건으로 시험을 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 절차서를 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 재 작성한 무효전력 공급능력 곡선을 상호 비교 검토함으로써 설정값의 적정성과 실제 계통과 연계되어 운전 중인 발전기 무효전력의 조절을 통해 설정된 값들의 유효성을 검증하였다.

**2.2 진상 무효전력 제한 (UEL : Under Excitation Limiter)**

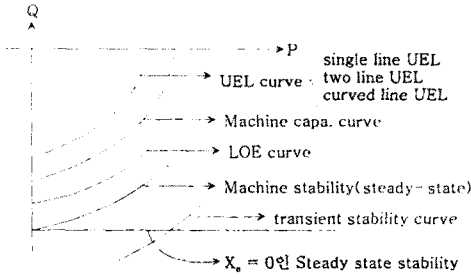
진상 무효전력 제한의 목적은 발전기 철심 단부의 과열방지 및 전기자 반작용의 증가작용으로 인한 발전기 안정도 저하 방지이다. 진상 역률(부족 여자상태)에서는 계자전류의 크기가 작기 때문에 유지환(Retaining ring)은 포화되지 않은 상태이고 따라서 고정자 권선 단부의 누설 자속이 커지게 된다. 뿐만 아니라 부족여자 상태에서는 고정자 권선의 전류에 의하여 발생한 자속이 계자전류에 의한 자속과 합쳐지게 되므로 고정자 단부가 국부적으로 과열이 되어 문제가 된다.

아래의 [그림 2]는 부족여자 제한기의 블록도를 나타내는데 진상 무효전력 제한에 사용하는 부족여자 제한기는 발전기의 유효 전력을 단자전압의 자속으로 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 제한된 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.

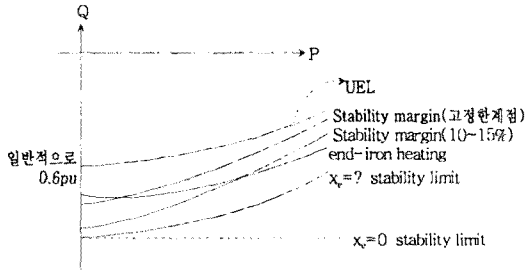


**<그림 2> 부족여자 제한기 블록도**

[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.



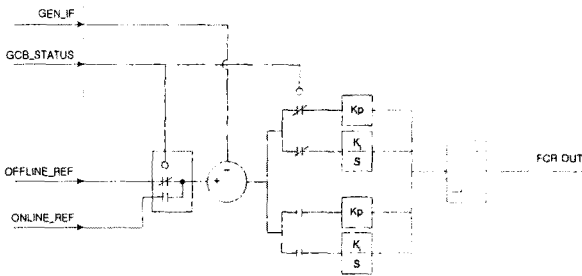
〈그림 3〉 부족여자 운전 및 보호한계



〈그림 4〉 부족여자(UEL) 결정 방법

**2.3 지상 무효전력 제한 (OEL : Over Excitation Limiter)**

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 발생하는 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 블록도를 나타낸다.

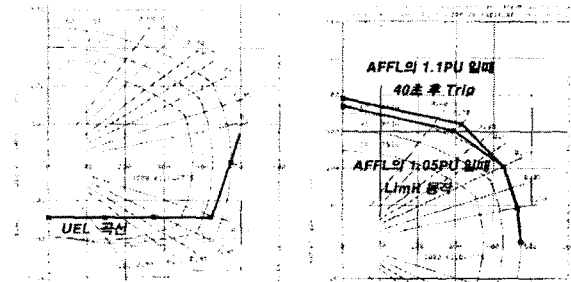


〈그림 5〉 과 여자 제한기 블록도

**2.4 대상발전기 무효전력 성능시험 결과**

**2.4.1 정지 중(Off-Line) 무효전력 성능시험 결과**

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. 대상발전소 A 발전기의 과 여자제한은 정격 계자전류(4325A)의 1.05PU(4541A)일 때 제한동작을 하고, 1.1PU(4758A)일 때 40초 후에 정지(Trip) 동작이 이루어졌다. 다음의 [그림 6]은 발전소 정지 중에 발전기 모의 시뮬레이터를 이용하여 현재 설정되어 있는 진상/지상 무효전력의 제한 값들을 시험 및 확인한 후 그 결과를 제작사가 제시한 발전기 능력곡선 상에 도시하여 정상적으로 설정되어 동작하는 것을 보여주는 그림이다.



〈그림 6〉 진상/지상 무효전력 제한곡선

**2.4.2 운전 중(On-Line) 무효전력 성능시험 결과**

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 출력 대별 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 내 모선전압 등 운전 범위의 한계로 인해 제약은 있었으나 발전기 능력 곡선과 진상/지상 무효전력의 각 제한 곡선 안에서 안정적으로 운전되는 것을 확인 할 수 있었다. 운전 중 무효전력의 성능시험의 결과로는 정격부하의 100%(400MW), 75%(300MW), 65%(260MW)에서 시험을 시행하여 무효전력의 최대 운전 범위는 지상무효전력 +266MVar(260MW, 19.8kV), 진상 무효전력 -88Mvar (260MW, 18.34kV)이었으며, 발전기 계자전류의 최대 상승값은 400MW 부하에서 지상 무효전력 시험 시 4200A이었다. 시험대상 발전기의 사양은 발전기 정격전압은 19.00[kV], 정격 유효전력은 400[MW], 정격 계자전압 385[V], 정격 계자전류는 4325[A]이었으며, 아래의 [표 1]은 대상발전기의 운전 중 지상/진상 무효전력의 성능시험 결과 데이터를 나타낸다.

〈표 1〉운전 중 지상/진상 무효전력 성능시험 결과 데이터

출력 (MW)	발전기 운전 DATA							
	단자전압 (kV)	무효전력 (MVar)		유효 전력 (MW)	단자 전압 (kV)	계자 전압 (Volt)	계자 전류 (A)	
		예상값	측정값					
지상 영역	100% (400MW)	19.00	114	119	403.5	19.0	254	3564
		19.66	223	223	407.7	19.73	307	4193
	75% (300MW)	19.00	103	84	300	19.0	203	2933
		19.70	223	228	300	19.84	277	3878
	65% (260MW)	19.00	95	88	260	19.0	192	2800
		19.74	222	222	260	19.82	260	3677
진상 영역	100% (400MW)	19.00	109	50	403.5	19.0	254	3564
		18.34	-64	-70	398.4	18.21	197	2834
	75% (300MW)	19.00	98	43	302.2	18.92	188	2737
		18.34	-75	-83	299.7	18.19	151	2210
	65% (260MW)	19.00	90	57	260.2	18.99	180	2608
		18.34	-83	-88	259.2	18.13	132	1958

**3. 결 론**

전력계통의 안정도 향상과 신뢰도 확보를 위한 무효전력의 공급 능력의 확보를 통해 대규모로 복잡화 되고 있는 전력계통의 운용 여 유확보와 무효전력 적정 수급계획 수립 등 전력계통 전압안정도 향상을 위한 제반 계통 검토 시 기본 자료로 활용될 것이며, 발전기 무효전력 운전특성의 정확한 데이터를 확보를 통해 효율적인 계통운용 및 설비 이용을 향상에 크게 기여할 것으로 기대된다.

**[참 고 문 헌]**

- [1] 임익현, 이주현, 신만수, 이병구, 장민구, 신중선, 이창근 외 14, "전력계통 안정도 확보를 위한 발전기 무효전력 성능시험 방안 개발에 관한 연구", 한국전력거래소 계통운용처 중간보고서, 2005
- [2] 임익현, 이주현, 류호선, 신만수 외 5, "800MW 발전기용 다중화 정지형 여자시스템 개발 최종보고서", 전력연구원, 2001
- [3] 신만수, 류호선, 이주현, 임익현, 김봉석, 송성일, "여자시스템 제어 및 진단기법 개발", 전기학회 하계학술대회는문집, D.권, p2597-2599, 2005