

양양 양수 발전기의 계통 운전시 무효전력 운전범위와 OEL 동특성 시험

김동준 문영환 한종렬 이광식  
한국전기연구원 양양양수발전소

Tests on the Reactive Power Limit and the OEL Dynamics of Yang-Yang P/P in Operation

D.J.Kim Y.H.Moon J.R.Han K.S.Lee  
KERI KOMIPO

**Abstract** - This paper deals with tests on the reactive power output limit and the Over-Excitation Limiter (OEL) dynamics of generation unit. The suggested reactive limit test methods can identify the allowable maximum/minimum reactive power at 100% rated MW in the steady-state operation condition. The on-line OEL limit test method can identify the time characteristics of OEL with the generation output at 50% of the rated MW. These methods are validated by applying to Yang-Yang Pumped storage units of 282 MVA.

검증하는 것은 매우 어렵다. 한편 UEL의 동특성은 발전기의 출력 과부하시 그다지 중요하지 않으며 보통 UEL 무효전력 한계치가 고정되어 있다. 본 논문은 발전기의 정상운전 상태에서 무효전력 운전 가능범위 시험과 OEL 동적 특성 파악을 위하여 현실적이면서도 효과적인 시험방법을 제안하고, 제안된 방법을 양양 양수 발전기에 적용하여 그 유효성을 확인한다.

2. 본 론

1. 서 론

최근 대형정전사고는 전력시스템의 동적 모델링의 중요성을 더 부각하고 있다. 정확하고 최신의 발전 설비 동적 모델 데이터는 계통 운용과 계획에 가장 중요한 수단이 되고 있고, 정전사고를 미연에 방지할 수 있으며 설비투자를 최적으로 할 수 있는 중요한 자료가 된다. 발전설비 동적 모델링 데이터에서 가장 중요한 데이터 중 하나는 발전기 무효전력 한계 데이터와 OEL 동적 특성 데이터이다.

계통에서 운전 중인 발전기의 무효전력 운전범위 시험 (Reactive limit test)은 과여자 제한장치(OEL)/저여자 제한장치(UEL) 동특성 시험과는 서로 의미가 다르며 따라서 이들 시험과는 구분되어야 한다. 먼저 운전 중인 발전기의 무효전력 운전범위에 관한 시험이란 정상적인 발전기 정격 유효전력 출력조건에서 최대/최소 공급할 수 있는 무효전력 출력시험을 말한다. 계통 전압상황이 매우 높거나 낮은 경우는 OEL과 UEL의 한계치에 의하여 무효전력의 출력이 제한될 수도 있다. 그러나 그런 경우는 매우 드문 경우이다. 대부분의 경우 정상상태 무효전력 한계는 1) 발전기 정격 100% MVA에서 정해진 정격의 무효출력이나 2) 발전기 과/저전압에 제한 (통상 정격전압의 ±5%)을 받는다. 또는 접속된 인근 계통의 전압 상황이 좋다하더라도 발전기 정격 100% Mvar 출력에도 도달하기 전에 발전기 단자전압의 최대/최소전압 또는 소내 최대/최소 전압에 의하여 출력 확인시험이 제한을 받는다.

반면에 OEL의 동특성은 과도상태에서 중요하게 고려하는 무효전력 한계특성이다. 반면 OEL 동적 특성은 과부하시 계통에 사고가 발생할 경우 매우 중요하며 경우에 따라서는 대형 정전사고를 유발할 수 있다. 그러나 OEL 시간 특성시험은 정상상태에서 그 특성을 파악하기 매우 어렵다. OEL 설정치는 보통 정격 계자전류의 110% 정도로 설정 되는데 큰 외란이 발생하지 않으면 이 설정치에 도달하지 않는다. 더구나 OEL 동적 특성 시험은 발전기 계자전류가 인위적인 외란 발생 후 과도 상태에서 OEL 계자전류 설정치를 초과 하도록 해야 한다. 이와 같은 이유로 on-line상에서 OEL의 과도 특성을

2.1 무효전력 운전가능 범위 시험

정상상태 계통병입상태에서 무효전력 운전가능범위 시험은 발전기의 100% 정격 출력조건에서 실시한다. 이 시험은 최소 무효전력 한도와 최대 무효전력 한도 시험으로 이루어진다. 특히 이 시험에서 중요한 것은 최대 무효전력 한도시험으로서 발전기 100% 정격 MW 출력 조건에서 정격역률에 해당하는 무효전력을 출력할 수 있는가를 확인하는 것이다(그림 1 참조). 정격역률에 해당하는 Mvar를 확인하는 것은 발전소의 위치, 계절 및 운전시간, 발전기 승압변압기 탭 설정치, 소내 전압, 현장 시험시의 계통 조건에 영향을 받는다. 따라서 계통조건에 따라 무효전력 출력한도가 현장시험에서 확인되지 않을 수 있다.

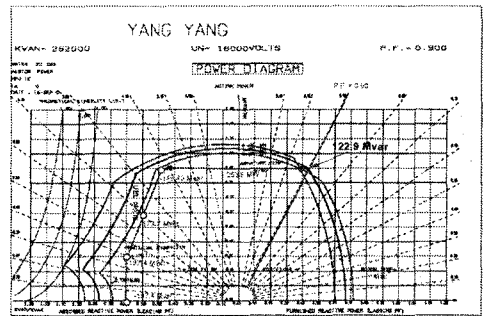


그림 1. 발전기의 정격역률과 무효전력공급곡선

2.1.1 최소 무효전력 범위 시험

최소 무효전력 범위 시험은 정격 100% MW 출력에서 최소 Mvar 출력능력을 확인하는 것이다. 제안된 무효전력 한계 시험은 그림 2와 같다. 발전기 고정자 전압의 한계는 95%로 제한한다. 시험 중에 단자전압 95%, 정격역률의 Mvar, UEL 설정치 제한, 또는 소내 저전압 한도에 도달하면 이때의 값이 최소 무효전력 한도가 된다. 따라서 시험 할 때 발전기 인근계통 조건에 따라서 최소 무효전력 한도는 달라질 수 있다. 그리고 최소 무효전력 출력한도 시험에서 최소 무효전력이 측정할 경우 그 순간의 측정제한 요소를 명기하는 것이 필요하다.

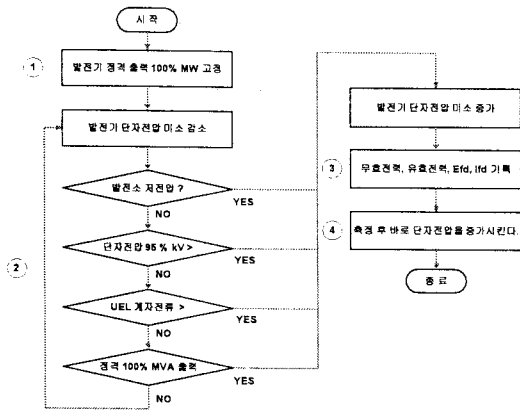


그림 2. 계통운전시 최소 무효전력 한계시험 절차

### 2.1.2 최대 무효전력 한계 시험

최대 무효전력 한계 시험 방법은 그림 3과 같다. 고정자 단자전압의 제한 값은 105%로 한다. 정격 100% MW 출력에서 단자전압을 올린다. 그리고 100% Mvar 출력이 될 수 있도록 단자전압을 천천히 상승시킨다. 고정자 단자전압을 상승하면서 제약 조건에 걸리는 가 확인한다. 제약조건은 단자전압 정격 105%, 온도, OEL, 소내 전압 등이 될 수 있다. 만약 제약조건에 걸리게 된다면 이 때의 Mvar에서 15분간 연속 운전한다. 15분간의 운전중에 다른 제약조건이 발생해서 운전하지 못하는 경우는 단자전압을 더 낮추어 낮은 Mvar에서 15분간 운전한다. 그리고 15분 연속운전을 할 수 있는 운전점이 최대 무효전력 한계치가 된다. 이때도 최대무효전력 한계치의 제한요소를 명기한다. 그림 3과 같은 시험절차를 사용하나 될 수 있으면 정격 100% Mvar가 출력될 수 있도록 시험하는 것이 중요하다. 따라서 고정자 전압이 105% 이상 더 높일 수 있다면 약간 더 높여서 운전하고, 인근 계통 전압이 상대적으로 높다면 승압 변압기의 탭도 상향 조정하여 단자전압이 과도하게 상승하지 않도록 운전하도록 한다.

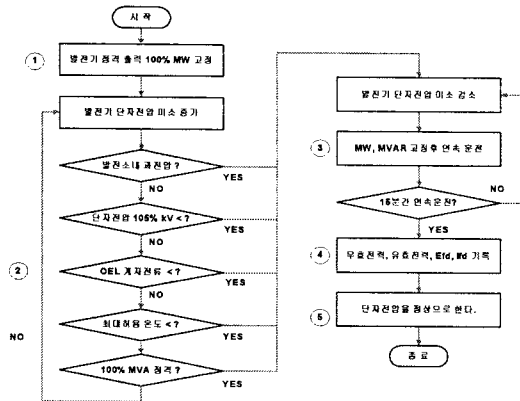


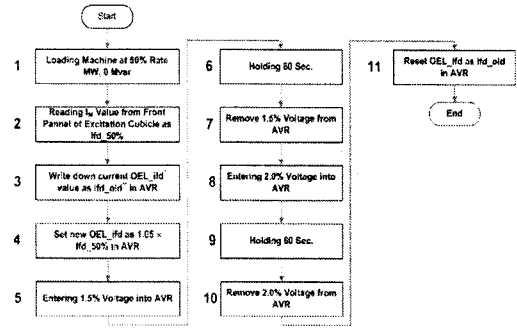
그림 3. 계통운전시 최대 무효전력 한계 시험절차

### 2.2 OEL 동특성 시험

계통병입 상태에서 OEL의 동적 한계 특성을 시험하는 조건을 얻는 것은 쉽지 않다. 왜냐하면 OEL이 동작하는 계자전류의 설정을, 통상 정격 100% MW 출력에서 측정된 계자전류의 110%로 설정하기 때문이다. 따라서 여기서 제안하는 방법은 OEL의 계자전류 설정치를 50% MW로 낮게 셋팅하여 OEL의 동적 특성을 간접적으로 확인 하는 것이다. 최근의 여자시스템 제어기는 디지털 방식이므로 50% MW에서 OEL 계자전류를 계통병

입상태에서 재설정하는 것이 용이하며, 이러한 50% MW에서 확인된 OEL 동적 특성은 100% MW 운전 수준에서도 동일하게 특성을 갖게 되는 것이다.

그림 4는 제안된 OEL 동특성시험 방법으로서 발전기 정격의 50% MW 출력으로 OEL 계자전류를 재설정하고, 운전상태에서 AVR 스텝시험을 통해서 외란을 발생해서 계자전류가 OEL 계자전류 설정치를 초과하도록 하여 OEL 동적특성을 측정한다. OEL 동적특성이 한시특성인 경우 그림 3과 같이 적용할 수 있고, 정한시 특성인 경우는 AVR 스텝시험을 1번만 수행한다.



\* OEL\_Id : On Line OEL (AFFL)

그림 4. 계통 운전시 OEL 동특성시험 절차

### 2.3 계통 적용

제안된 무효전력 출력한도 시험방법과 계통병입 운전시 OEL 동특성 시험방법을 양양 양수 발전소에 적용하였다. 양양 양수 발전소는 282MVA 발전기 4대로 구성되어 있고, 2006년에 완공된 쉐인식 양수 발전소이다. 양양 양수 여자제어시스템은 ALSTOM사의 제품으로 디지털 제어기를 사용하고 있다. 표 1은 양양 양수 여자시스템에 설정된 무효전력한계치에 관련한 설정값이다.

표 1. 양양 양수 무효전력 관련 제어기 설정값

형식	설정치	비고
OEL	- 정격 계자전류: 1906 Amp - On line OEL (AFFL): 2096.6 Amp - Ceiling 계자전류: 3050 Amp (duration 5초)	제한시
UEL	0 MW -197.4 Mvar 84.6 MW -197.4 Mvar 169.20 MW -177.7 Mvar 253.83 MW -149.49 Mvar	고정형
V/Hz	- 108%	
GSU 변압기	- 18.0kV/365 kV 변압기 (HV: 탭/총17개) - 1.25%/탭	정상 운전 중인 탭: 8 번 탭

### 2.3.1 양양 양수 무효전력 한계 시험

양양 양수 발전소는 울진 원자력 발전소의 영향으로 인근 계통 전압이 상대적으로 높다. 따라서 발전기 정격 100% MW (253.5MW) 출력에서 정격역률 Mvar (123 Mvar)를 출력하는 것이 곤란하다. 이러한 문제점 때문에 양양 양수 3호기 무효전력 한계시험에서는 발전기 승압 변압기의 설정치를 정상운전 값보다 2.5% 상향 조정하고, 단자전압을 107%까지 높여서 정격 100% Mvar에서 15분간 운전하였다. 최소 무효전력 한계 시험은 발전기 95% 고정자 전압에서 무효전력이 -66.12 Mvar까지 출력되었다. 이 시험에서 정격 최소 무효전력 출력에 미치지 못하나 저여자는 비교적 중요 관심사항이 아니기 때문에 더 이상 고정자 전압을 낮추지는 않았다. 만약 승압 변압기 탭을 상향조정하지 않았다면 1호기처럼 95%전압에서 -100 Mvar까지 출력되었을 것이다. 시험 결과는 표 2와 같다.

표 2. 양양 양수 3호기 무효전력 한계치 시험 결과

항 목	$V_t$ (kV)	P (MW)	Q (Mvar)	$E_{fd}$ (Vdc)	$I_{fd}$ (Amp)	제한요소
최대무효전력	18.265 (107 %)	256.0	130.0	264.59	1875.8	기기 100% Mvar
최소무효전력	17.01 (95%)	256.0	-66.12	157.0	1185.0	기기 저전압 (0.95 pu)

2.3.2 양양 양수 OEL 동특성 시험

제안된 OEL 동적 특성시험 방법을 양양 양수 4호기에 적용하였다. 양양 P/P 4호기에 대한 운전시 OEL 동특성 시험은 OEL 계자전류 설정치가 2096.6 Amp로 정상적인 운전 상태에서는 시험할 수 없었다. 이러한 이유로 부하를 정격출력의 50%인 126 MW 수준으로 운전하고, OEL 계자전류 설정치를 1190 Amp로 낮추어서 시험하였다. 이 시험 방법은 앞 절에서 기술한 바와 같이 시험전의 운전조건이 계자전류가 OEL 설정치보다 약간 낮은 값이 되도록 운전하였는데, AVR 기준신호의 1.5%의 변동을 위한 스텝응답 시험을 하였을 때 최종 수렴되는 계자전류가 1190 Amp보다 상회하도록 하는 것이다.

양양 P/P OEL은 정한시 특성을 갖고 있기 때문에 이 시험으로 duration time을 도출할 수 있고, OEL 특성이 제대로 나오는지 검증할 수 있었다. 본 OEL 동적 특성 시험은 국내에서는 최초로 수행된 것이다. OEL 제어장치가 디지털이기 때문에 50% 부하에서 특성시험을 수행했지만 실제 설정치인 100% 부하대에서도 50% 부하대에서 시험한 OEL 특성이 그대로 재현될 것이다.

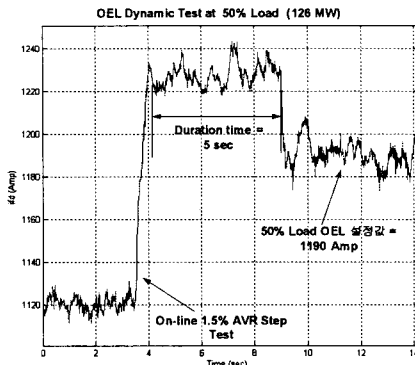


그림 5. OEL 동적 특성시험인 경우 측정된 계자전류 (On-line 1.5% AVR 스텝-업 시험)

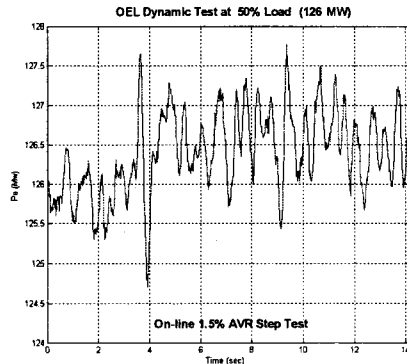


그림 6. OEL 동적 특성시험인 경우 측정된 유효전력 (On-line 1.5% AVR 스텝-업 시험)

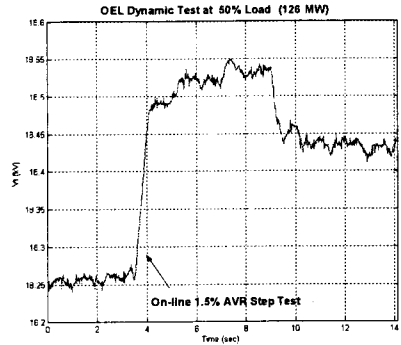


그림 7. OEL 동적 특성시험인 경우 측정된 단자전압 (On-line 1.5% AVR 스텝-업 응답시험)

그림 5는 측정된 계자전류를 보여주고, duration time은 5초이다. 그림 6은 유효전력을 보여주고, 그림 7은 단자전압을 보여준다. 그림 5는 1.5% AVR 스텝시험 전에는 계자전류가 조정된 OEL 계자전류 (1190 Amp)보다 다소 낮은 1120 Amp로 운전되고 있음을 보여준다. 1.5% AVR 스텝시험 이후에는 계자전류가 1220 Amp로 OEL 계자전류 설정값보다 높다. 따라서 OEL 제어 장치는 5초 동안 duration time을 갖고 OEL 설정치인 1190 Amp로 계자전류를 강제로 감소시킨다. 이러한 시험 결과는 양양양수 4호기의 OEL 장치가 제대로 동작되고 있음을 의미한다. 따라서 정격 100% MW 출력에서도 OEL 제한 장치는 설정된 동일한 특성을 나타나게 될 것이다.

3. 결 론

본 논문은 현실적이면서 효과적인 정상상태에서 무효전력 운전범위 시험 방법과 계통 운전시 OEL 동특성시험 방법을 제안하였고 제안된 방법은 양양 양수 발전기에 적용하여 그 유효성을 아래와 같이 확인하였다.

1) 인근 계통 전압이 높은 이유로 양양 양수 3호기의 최대 무효전력 한계 특성시험에서는 정격 100% MW출력에서 정격역률의 Mvar 출력 확인을 위해서 능동적으로 고장자 전압이 허용할 수 있는 최대 전압까지 올리고 발전기 승압 변압기 탭을 2.5% 상향 조정하여 15분간 운전하여 그 특성을 확인하였다.

2) 제안된 OEL 동적 특성시험은 정격의 50% MW에서 수행하기 때문에 보다 안전하게 시험할 수 있고 신뢰도 높은 시험 결과를 얻을 수 있다. 제안된 방법은 국내에서 최초로 양양 양수 4호기에 적용하여 양양 P/P OEL 동적 정한시 특성을 50% MW에서 확인하였고, 제안된 시험방법의 유효성을 검증하였다.

결론적으로 발전기의 최대무효전력 한계 특성은 계통에 큰 사고가 발생할 경우 계통 신뢰도에 지대한 역할을 할 수 있으며, 특히 OEL 제어 특성은 대형 정전사고의 원인으로 주로 등장하기 때문에 지속적으로 OEL 모델링 정밀도를 향상시키고 새로운 OEL 특성시험 기법의 개발 노력을 경주해야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국중부(주) 양양 발전소, 양양 P/P #3 발전기/제어계 특성시험 및 모델정수 도출, 2006. 8. 한국전기연구원
- [2] 한국중부(주) 양양발전소, 양양 P/P #4 발전기/제어계 특성시험 및 모델정수 도출, 2006. 9. 최종보고서, 한국전기연구원
- [3] 한국전력거래소, 발전기 안정도 해석 파라미터 도출 및 검증기법 표준화 연구, 최종보고서, 2006. 8. 한국전기연구원
- [4] Test guidelines for synchronous unit dynamic testing an d model validation, Feb. 1997, WSCC