

## Development of Generator Reactive Capability Test Method in Generation Stations

신 만 수\* · 정 태 원\*  
(Man-Su Shin · Tae-Won Jeong)

**Abstract** - Generation cooperations have focused on active power directly related to economic value. So, utility cooperation have taken expense to stabilize power system, although generator has responded quickly with variation of power system voltage and is controlled at real time. As a reactive power source, it is necessary for generator's capabilities to be verified. But domestic generators scarcely have been tested and operated to reactive power capability. In case of power system fault, operators would not quickly take a follow-up actions about reactive power disturbance. Therefore generator reactive power capability verification strategy must be developed, several generators is tested as examples since 2004. This paper is extracted from the test results.

**Key Words** : AVR, Reactive power, Performance, Procedure, Generator, Excitation system

### 1. 서 론

2003년 8월에 북미에 광역정전이 발생했는데, 이와 관련하여 전기위원회에서는 국내 전력계통을 분야별로 집중 검토한 결과로 '발전기 무효전력 공급능력시험'을 무효전력 및 전압제어 안정도 분야의 주요 개선 추진항목으로 선정하였다. 한편 발전기는 전압 변동에 대해서 응답속도가 빠르고 실시간 제어가 가능하고 추가 경제 부담이 없다는 측면에서 아주 우수한 무효전력 공급 및 소비원으로 평가되고 있다.

지경부 제2005-11호 고시에 따르면, <전기사업법 제18조, 동법시행규칙 제18조에 의해 전력계통 신뢰도 및 전기품질의 유지기준 등을 고시하였는데 무효전력 성능과 관련된 부분을 살펴보면 다음과 같다. 전력시장에 참여하는 발전기는 정격출력 기준으로 지상역률 0.9에서 진상역률 0.95 범위에 해당하는 무효전력을 정격출력 범위내에서 공급할 수 있는 성능을 갖추어야 한다. 발전기의 무효전력 출력은 전력거래소에 등록된 발전기별 특성범위 내에서 운영할 수 있어야 한다.>고 되어 있다.

이럼에도 불구하고 발전소에서는 직접적으로 경제적인 매출과 관련되는 유효전력에 대해서는 엄격히 관리되고 있는데 반해서 경제적인 매출과 직접적으로 관련이 없는 무효전력에 대해서는 그렇지 못한 편이다. 발전기는 진상영역 또는 지상영역에서 운전되는데 한계 범위를 벗어나지 못하도록 제한 기능을 하는 알고리즘이 구현되어 있다. 일부 발전기는 이런 제한 기능이 없고 바로 발전기 정지로 이어지는

보호 기능만 구비되어 있는 경우도 있었다.

국내에서는 아직 체계적으로 발전기에 대한 무효전력 공급능력에 대해서 강제할 수 있는 규정이 마련되어 있지 않으나 조만간 법 규정이 정비될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 시범적으로 8개 발전기를 정하여 실계통에서 무효전력 성능시험을 실시하였는데, 본 논문에서는 그 결과를 기술하고자 한다.[1]

### 2. 본 론

#### 2.1 무효전력 성능시험 개요

전압 안정도와 장주기 안정도 연구에 있어서, 동기기의 무효 능력을 고려하는 것은 중요하다. 여기서는 이러한 제한을 규명하는 능력 곡선을 알아보았다. 동기 발전기들이 규정된 전압과 역률(대개 0.85 또는 0.9)에서 과열없이 연속적으로 운전할 수 있는 최대 피상전력으로 정격이 결정된다. 발전기의 능력은 세 가지 고려사항(전기자 전류 제한, 계자전류 제한, 전기자 단부 열 제한)에 의해서 제한된다.

#### 2.2.1 전기자 전류 제한

전기자 전류( $I_t$ )는  $I^2R$  전력 손실( $R$ :전기자 저항)을 갖는다. 이 손실과 관계된 에너지는 도체의 온도 상승을 제한하기 위해서 제거되어야 한다. 그러므로 발전기 정격의 제한 조건 중의 하나는 열적 제한을 초과하지 않는 전기자 전류이다. 발전기 단자전압이 일정하다고 가정하면, P-Q 평면에서 피상전력은 전기자 전류를 반지름으로 하여 그려진다.[2] 이 제한은 기계적인 에너지에 의해서 제한되며 기존 시스템에서 별도의 제한회로를 갖고 있는 경우가 없어서 본 논문에서는 다루지 않았다.

\* 교신저자, 정희원 : KEPCO 전력연구원 선임연구원

E-mail : fullstone@kepcoco.kr

\* 정희원 : 충남대 공대 전기공학과 교수 · 공박

접수일자 : 2011년 2월 22일

최종완료 : 2011년 4월 19일

2.2.2 계자 전류 제한

$R_{fd} \times (i_{fd})^2$  전력손실로부터 야기된 열 때문에, 계자전류는 발전기 운전에서 하나의 제한이 된다. 일정한 계자전류의 제적은 정상상태 등가회로부터 유도된다.  $X_d = X_q = X_s$  라는 가정하에, 그림 1 간략화된 동기기 모델의 등가회로와 대응되는 그림 2 정상상태 페이저에서 다음식이 유도된다(전기자 저항  $R_a$ 는 무시). 계자전류가 정해졌다면, 그림 3과 같이 유효전력과 무효전력과 관계는 P-Q평면에서  $(0, -E_t^2/X_s)$ 를 중심으로  $(X_{ad}/X_s)E_t \times i_{fd}$ 를 반지름으로 하는 원이다. 그러므로, 동기기의 능력에서 최대 계자전류의 효과는 다음 식 (1), (2)와 그림 3에서와 같이 나타난다. 어떠한 설계에서도 계자와 전기자의 열적 제한은 동기기 정격 역률에서의 피상전력 지점에서 교차된다.[2]

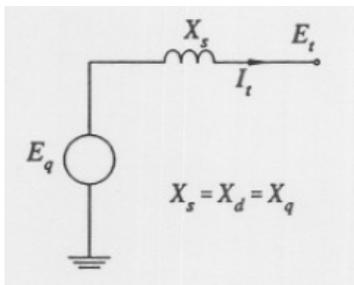


그림 1 간략화된 동기기 모델  
Fig. 1 Simplified synchronous machine model

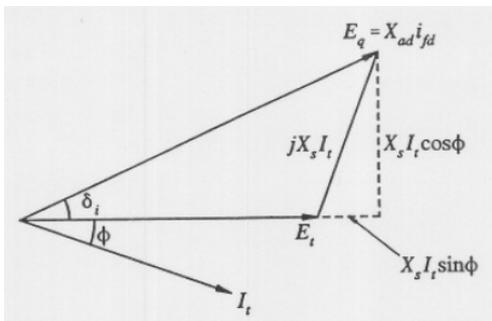


그림 2 정상상태 페이저도  
Fig. 2 Static state phasor

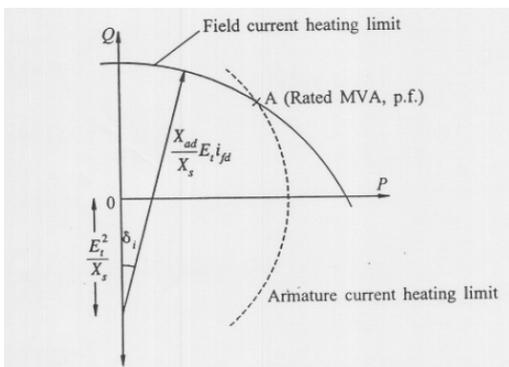


그림 3 계자전류 열적 제한  
Fig. 3 Thermal restriction by field current

$$P = E_t \times I_t \times \cos \phi = \frac{X_{ad}}{X_s} E_t \times i_{fd} \times \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = E_t \times I_t \times \sin \phi = \frac{X_{ad}}{X_s} E_t \times i_{fd} \times \cos \delta - \frac{E_t^2}{X_s} \quad (2)$$

2.2.3 전기자 단부 열적 제한

전기자 단부에서 국부적인 과열은 동기기를 운전하는데 또 하나의 제한 요소가 되는데, 특히 부족여자 조건에서 동기기의 능력을 제한하는 요소가 된다. 과여자 조건에 해당되는 높은 계자전류는 유지환을 포화되게 해서, 말단 누설자속을 작게 만든다. 그렇지만, 부족여자 지역에서 계자전류는 적어서 유지환은 포화되지 않는 관계로 고정자 단부에서 누설자속을 증가시킨다. 또한, 부족여자 조건에서, 전기자 전류에 의해서 생성된 자속은 계자전류에 의해서 생성된 자속에 합쳐지므로 End-turn 자속은 단부에서 축(axial) 자속을 강화하고 그 결과로 생긴 열적 영향은 발전기 출력을 심각하게 제한할 수 있다.[2]

2.2.4 발전기 성능곡선과 V 곡선

발전기 운전 조건의 상기 제한들은 동기기 능력에 의한 것이고, 그림 4와 같이 전력 계통 안정도 제한에 의한 추가적인 제한들, 즉, 냉각 매체인 수소 압력 등에 달려 있다. 일정한 발전기 단자전압에서 전기자 전류와 계자전류의 관계를 보여주는 곡선이 바로 V 곡선이며, 그림 5와 같다. 각 곡선은 계자전류가 일정한 역률을 유지하기 위해서 어떻게 다양화되는지를 보여주고 있다.[2]

V 곡선은 정상상태 방정식을 사용해서 계산될 수 있다. 그림 4와 그림 5에서 AB 구역은 계자전류 제한이고, BC는 전기자 전류 제한이고, CD는 전기자 단부 열적 제한이다. V 곡선의 세로축은 전기자 전류 또는 피상전력이고 가로축은 계자전류이다. 1.0pu 계자전류는 정격 역률에서의 정격 피상전력에 대응되는 값이다. 발전기 성능곡선에서는 계자전류가 표시되지는 않지만 V곡선에서 계산되어 표시될 수 있다. 예를 들어서 계자전류가 정격전류의 105%로 운전된다면 그림 4에서는 <AB> 구간보다 위에, 그림 5에서는 <AB> 구간보다 오른쪽에 표시될 것이다.

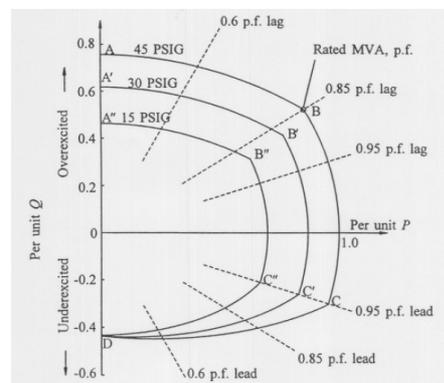


그림 4 수소압력에 따른 발전기 성능  
Fig. 4 Generator's performance by hydrogen's pressure

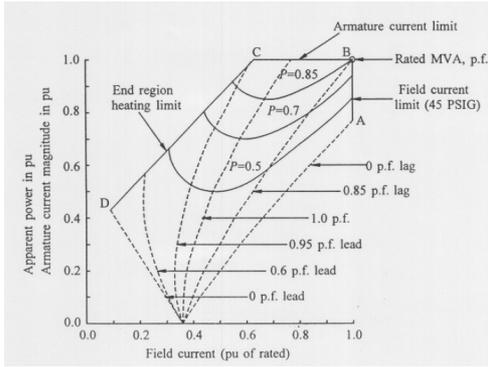


그림 5 V 곡선  
Fig. 5 V curve

2.2 기존 무효전력 성능시험과 순서

국내 사례에서는 발전기 단부나 전기가 권선이나 고정자 냉각수 온도 등을 측정하여 상승하지 않는 범위내에서, 발전기 단자전압을 95%까지 하강하여 진상영역 무효전력 성능 시험을 수행하고, 발전기 단자전압을 105%까지 상승하여 지상영역 무효전력 성능시험을 수행하였다.[3] 외국 사례에서는 북미 지역신뢰도 협의회 가운데 가장 큰 지역을 대상으로 하는 WECC에서는 과여자제한 및 보호시험을 다음과 같은 원칙을 가지고 실시하고 있었다.[4]

- 과여자제한 및 보호시험은 현장 시험을 통해서 확인되어야 한다.
- Pick-up 값, 지연시간, 제한이나 보호 동작된 값을 기록해야 한다.
- 시험할 동안 과도한 전류와(또는) 전압을 피하기 위하여 제한치와(또는) 보호치를 변경할 필요가 있을 수 있다.
- 통상적인 계전기 시험 기법을 사용하여 발전기 정지 중에 제한기나 보호장치를 교정할 수 있다. 이 방법은 예기치 못한 불시정지를 방지할 수 있기 때문에 증기터빈 발전기에서 선호하는 방법이다.

과여자 제한기와 과여자 보호장치를 구분하는 것이 중요한데, 전자는 전압조정기를 통하여 정상운전범위 내에서 작동되며 계자권선의 열적능력 안에서 계자전류를 감소시키고 유지하는 역할을 하는데 반해, 후자는 발전기를 불시정지시키는 역할을 한다. 이 두 장치를 모두 시험하는 것이 이상적이며 이것은 발전기 불시정지를 야기하는 어떤 운전범위도 없다는 것을 보장할 것이다. 과여자 제한기와 보호장치 형태는 다양하지만 그 원리는 같다. 즉 여자 전원의 크기를 감시하여 단시간 동안 정해진 크기 이상으로 상승하는 과여자를 허용하고 일정 시간이 경과되면 여자전원을 감소시키거나 트립시킨다. 일반적으로 수력발전기에서는 정정치 변경 없이 수행되는 방법이 적합하고, 증기터빈발전기에서는 발전기가 정지되었을 때 수행하는 방법이 적합하다. 먼저 실계통시험이 적합한 수력발전기에서의 과여자 상태 시험방법은 계자전류를 시험값으로 빠르게 올리면 올릴수록 정확하기 때문에 전압조정기 설정값을 계단 입력하는 것이 바람직하다. 이런 작업을 수행하기 위해서는 전압조정기 회로

구조를 확인하는 것은 필수적이다. 이 방법이 여의치 않을 경우 전압조정기의 설정값을 이용하여 정상적인 수단을 통해서 여자전류를 증가시키는 방법이 있다. 과여자 보호장치 시험은 먼저 과여자 제한기의 기능을 불능처리하든지 과여자 제한기 정치를 보호장치의 정정치보다 위로 올려 놓은 다음에 실시한다. 상기 시험을 수행하는 전 기간동안 발전기 고정자 전류와 단자전압을 감시해야 하며 정해진 운전범위를 벗어남이 없어야 한다. 증기터빈발전기는 발전기 정지 중에 시험을 수행하는데, 과여자 제한기와 보호장치에 전원을 인가해서 시험하는데 pick-up 지점을 감시하고 입력신호를 주입해서 시험이 주입된다. 회로를 여자시스템에서 완전히 분리할 수 있다면 비슷한 방식으로 작업대에서 수행될 수 있다. 완전한 교정표가 부하상태에서 운전되는 동기기에서 나와야 하는 것은 필수적이며 과여자 제한기/보호장치의 입력신호/출력신호와 실제 동기기 크기들 사이의 관계식이 계산될 수 있다. 과여자 제한기의 효과를 계산하기 위해서는 전압조정기 시스템을 잘 이해하고 있어야 한다. 이 시험 방법은 실계통의 불시정지에 대한 위험부담을 최소화할 수 있는데 반해서 시험해야 할 회로에 대한 세부적인 지식까지 필요하기 때문에 매우 복잡하다. 그리고 이 방법은 획득되어야 할 시험대상 장치의 특성 데이터를 결과물로 생성하나, 실제 가능성을 보장할 수 없을 것이다. 그러므로 만약 과여자 제한기가 이 같은 방법에 의해서 시험되었다면 실제 운전에서 가능성은 상기에서 언급한 방법대로 하나의 운전점에서 시험 및 검증되어야 한다.[4]

2.2 제안된 무효전력 성능시험 방법

발전소의 무효전력 성능시험은 발전기 정지 중에 실시하는 방법과 발전기가 실계통에서 운전중일 때 실시하는 방법으로 나뉜다. WECC에 따르면 수력발전기에서는 실계통시험을 권장하고 증기터빈발전기에서는 정지중 시험을 먼저 수행하고 실계통에서 확인시험을 최소화할 것을 권장하였다.

본 연구에서는 먼저 관련 자료를 수집한 다음 발전기 무효전력 성능시험을 어떻게 할 것인지 구체적인 절차서를 마련하여 여기에 발전회사의 의견을 수렴하여 최종 확정하고 시험 대상 발전기를 발전회사별/연료별/여자시스템 형식별로 고려하여 8기를 선정하였다. 그 8기 발전기는 고리, 하동, 당진, 울산, 서인천, 평택, 무주 등이다. 자동전압조정기의 회로도를 분석하고 계획예방정비공사 기간에 동기발전기 시물레이터를 이용하여 발전기 무효전력 성능시험을 수행하였다. 그 수행 결과를 소내 발전기 및 인근 변전소의 계통해석을 한 다음, 그 결과를 기반으로 화력 발전기도 실계통에서 실제 시험을 수행하였다.[5] 그림 6의 동기발전기 시물레이터에 대해서 간략히 설명하자면, DSP(Digital Signal Processor)를 기반으로 구성되었으며, 현장 여자시스템과 발전기 단자전압과 단자전류, 계자전압 신호를 서로 주고 받으며 운전된다. 발전기 단자전압과 단자전류는 동기발전기 시물레이터에서 생성하여 현장 여자시스템에서 정상운전에 사용하는 발전기 변성기(PT, CT)의 2차측 크기로 공급해주고 여자시스템에서 정류된 계자전압(직류전원)을 입력받는다. 또한 동기발전기와 1기 무한대 모션이 모델링되어 있는 전력계통의 알고리즘을 내장하고 있으며 여자시스템의 정특성 및 동특성 시험이 가능하다.[6]

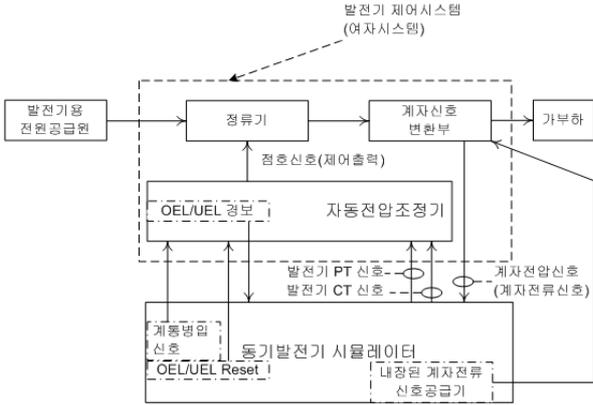


그림 6 동기발전기 시뮬레이터에 의한 무효전력 성능시험  
 Fig. 6 Reactive power performance test by synchronous generator simulator

2.2.1 발전기 정지 중 시험

발전기 정지 중 시험은 진상영역과 지상영역으로 구분되어 시험된다. 진상영역은 동기발전기 시뮬레이터를 이용하여 시험된다. 그림 7과 같이 발전기 정지 중에 진상영역 무

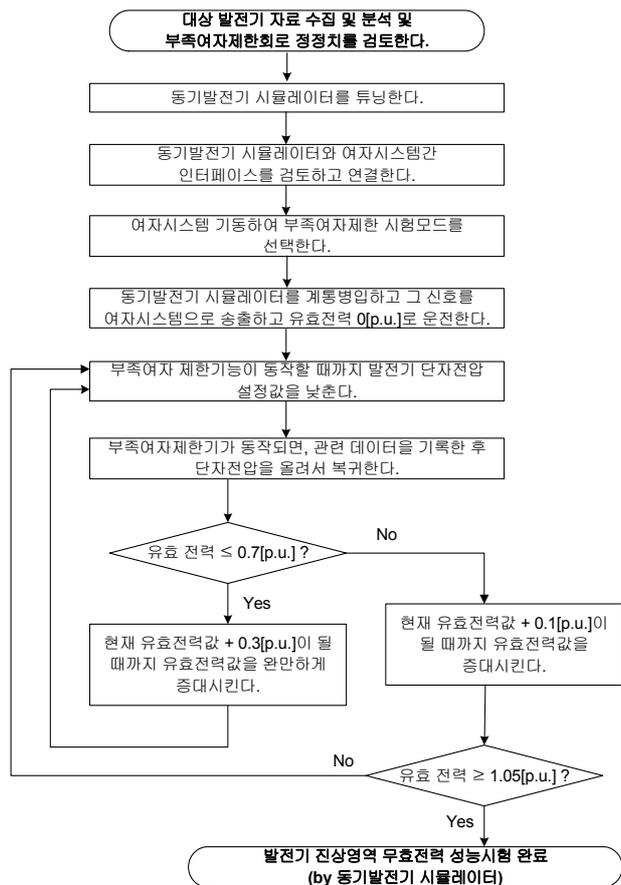


그림 7 발전기 정지 중 동기발전기 시뮬레이터를 이용한 진상영역 무효전력 성능시험 순서  
 Fig. 7 Generator's reactive power(leading power factor) performance test procedure by synchronous simulator (in generator shutdown)

효전력 성능시험을 수행하는데 간략히 설명하자면, 먼저 부족여자제한곡선 정정자료와 시험대상 시스템 자료를 입수하여 검토한 다음, 동기발전기 시뮬레이터를 해당 발전기 사양에 맞게 튜닝한다. 동기발전기 시뮬레이터와 현장 여자시스템 간 인터페이스가 완료되었으면 현장 여자시스템을 실계통에서 조작하듯이 기동한다. 시험은 유효전력 기준으로 각각 0[p.u.], 0.3[p.u.], 0.6[p.u.], 0.9[p.u.], 1.0[p.u.] 상태에서 발전기 단자전압을 내려서 부족여자제한기가 동작하는 것을 경보 등으로 확인할 수 있었다. 부족여자제한기를 시험하려면 복잡한 여자시스템 내부 회로도를 상세분석해서 일부 신호를 단락처리 등을 하여야 하는데 동기발전기 시뮬레이터를 이용하면 발전기 단자전압과 전기자 전류와 계자전압 신호만을 연결하면 간단히 기능시험을 수행할 수 있다는 점이 장점이다.

다음으로 발전기 정지 중에 지상영역 무효전력 성능시험을 수행하는데 그 방법을 기술하면 다음과 같다. 현장 여자시스템과 연결하였던 동기발전기 시뮬레이터 인터페이스를 해제한다. 그리고 계자전류나 계자전압을 감지하는 회로 측에 별도의 직류전원 공급장치를 연결하여 해당신호를 인가하여 시험한다. 이 방법은 상당히 어려운 방법이다. 발전기가 정상운전 중이라는 것을 회로적으로 모의하지 못하면 시험 자체가 불가능 수도 있다. 실제로 어떤 제작사 시스템에서는 정상상태 조건을 형성해주시지 못함에 따라 하드웨어적

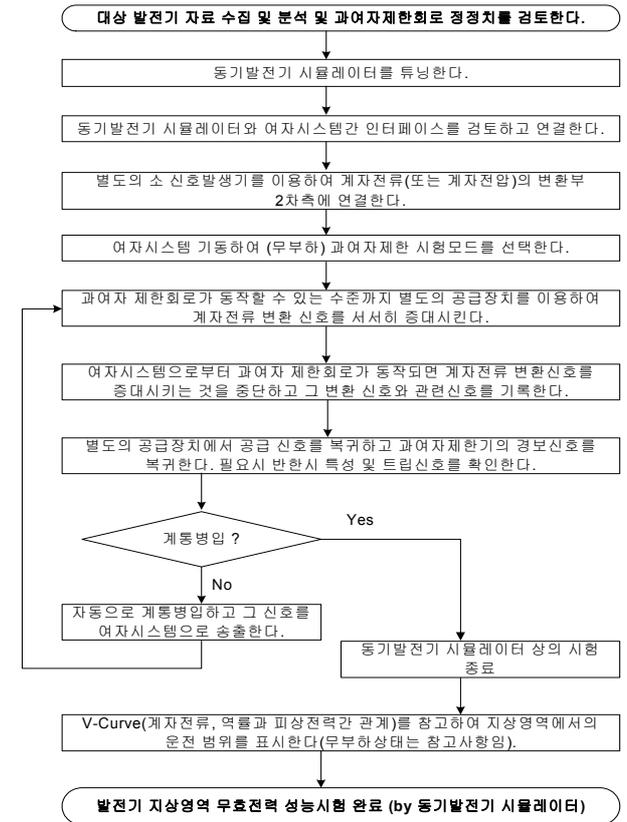


그림 8 발전기 정지 중 동기발전기 시뮬레이터를 이용한 지상영역 무효전력 성능시험 순서  
 Fig. 8 Generator's reactive power(lagging power factor) performance test procedure by synchronous simulator(in generator shutdown)

으로 확인하지 못하고 소프트웨어적으로 확인하는 것으로 대체한 경우도 발생하였다. 그래서 그림 8과 같은 시험방법을 제안한다. 본 시험 방법은 별도로 검증하지는 못하였지만 가능하리고 기대하며 향후 논문에서 수록할 기회가 있을 것으로 생각한다.

간략히 설명하면, 진상영역 무효전력 성능시험 수행방법과 같이 인터페이스 되며 추가로 계자전압(또는 계자전류)를 감지해내는 부분을 분리하고 별도의 소 신호발생기를 이용하여 여자시스템으로 공급한다. 이 방법은 진상영역 무효전력 성능시험 방법과 마찬가지로 복잡한 여자시스템 회로를 정밀 분석할 필요가 없는 장점이 있다.

2.2.2 발전기 운전 중 시험

상기와 같이 발전기 정지 중에 동기발전기 시뮬레이터를 이용해서 무효전력 성능시험을 수행하고 나면 그 결과를 바탕으로 전력계통해석을 실시한다. 전력계통해석은 PSS/E 전용 전력계통모의프로그램을 통해서 이루어지며 인근 변전소 조작까지를 포함하여 실시한다. 그래서 진상영역 성능시험은 가장 경부하시에 실시한다. 예전에는 경부하가 심야에 걸렸으나 최근에는 심야 부하가 들어가기 직전에 걸린다. 중부하 때는 하계에는 오후 2-3시대에 걸리며 춘추계에는 저녁 6-7시대에 걸린다. 동계에는 오전 11시대에 걸린다.

실계통에서 진상영역 무효전력 성능시험은 그림 9와 같이 정지 중 무효전력 성능시험 결과를 기초로 하여 PSS/E 전력계통 모의해석프로그램을 이용하여 전력계통 해석한 다음 시험 전에 대상발전기 인근 발전소 및 변전소에 운전 협조를 요청하고 진상운전에 맞는 시간대를 선정한다. 모든 조

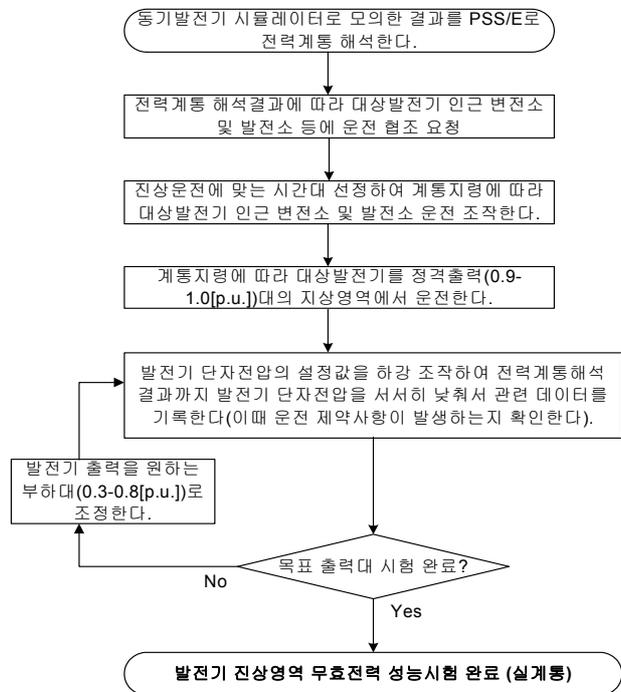


그림 9 실계통에서의 발전기 진상영역 무효전력 성능시험 순서

Fig. 9 Generator's reactive power(leading power factor) performance test procedure (on-line)

작은 계통지령에 따라 이루어지며, 인근 발전소는 지상운전을 한다. 100%, 75%, 50% 부하대별로 발전기 단자전압의 설정값을 하강 조작하여 사전에 전력계통 해석한 결과값까지 운전한다. 이때 운전하면서 제약사항이 발생하는지 감시한다.

실계통에서 지상영역 무효전력 성능시험도 그림 10과 같이 정지 중 무효전력 성능시험 결과를 기초로 하여 PSS/E 전력계통 모의해석프로그램을 이용하여 전력계통 해석한 다음 시험 전에 대상발전기 인근 발전소 및 변전소에 운전 협조를 요청하고 지상운전에 맞는 시간대를 정하여 시험을 수행한다. 먼저 정격출력에서 실시하고 75%, 50% 출력대에서 순차적으로 실시하는데 발전기 단자전압의 설정값을 상승 조작하여 사전에 전력계통 해석한 결과값까지 운전한다. 발전기 냉각매체 인입 및 인출측 온도를 지속적으로 감시한다. 각 출력대에서 시험시 각 기록점을 기록할 시간 동안 5-10분동안 운전 조작을 중지한다.

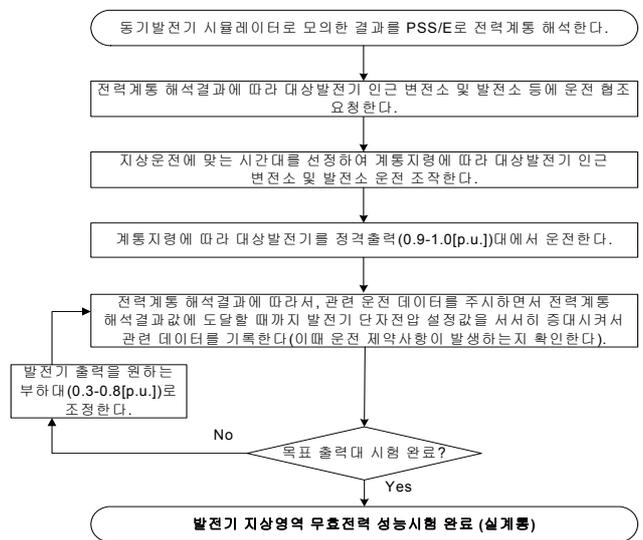


그림 10 실계통에서의 발전기 지상영역 무효전력 성능시험 순서

Fig. 10 Generator's reactive power(lagging power factor) performance test procedure (on-line)

3. 결 론

실계통에서 출력가능한 무효전력 성능을 완전하게 확인한 것은 아니지만 발전기 정지중에 무효전력 성능 최대운전범위를 확인함으로써 실계통에서 시험시 확실있게 조작 등을 할 수 있었다. 발전기 정지중과 운전 중에 시험한 발전기 무효전력 성능시험 결과를 그림 11과 같이 예시하였다. 정지 중에 모든 상황을 완벽하게 모의할 수는 없지만 최대한 근사하게 기능적인 면을 구현하여 실계통에서 발생할 수 있는 불확실한 면을 최대한 배제하여 안정적으로 무효전력 운전범위를 확인할 수 있었다. 8대의 시험대상 발전기를 시험하였는데 한 건의 불시정지를 야기하지 않고 안정적으로 시험을 수행해냈다는 것이 본 연구의 성과이다. 향후 오차율 범위 내에 드는 고성능의 시뮬레이터를 개발한다면 시간과

비용이 많이 드는 실계통 시험을 최대한 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

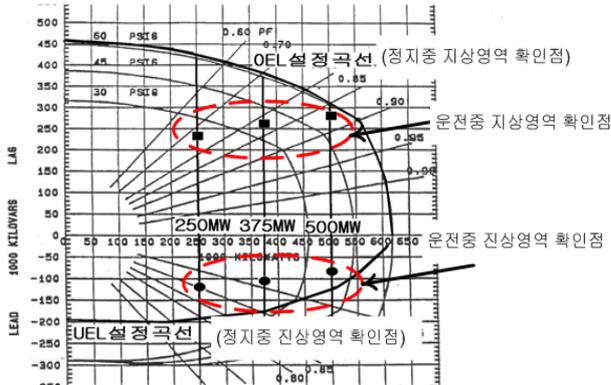


그림 11 발전기 정지중과 운전중에 시험한 발전기 무효전력 성능시험 결과 예시

Fig. 11 The example of generator's reactive power performance test result(on site)

참 고 문 헌

[1] 임익현, 신만수, 이주현, 류호선, 김봉석, 송성일, “전력 계통 안정도 확보를 위한 발전기 무효전력 성능시험 방안 개발에 관한 연구(최종보고서)”, pp 1, 2006

[2] P.Kundur, “Power System Stability and Control”, McGraw-Hill, Inc., pp 191-195, pp 1994

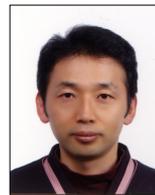
[3] 김동준, 문영환, “양양양수 온라인 무효전력 운전범위 시험과 과여자제한기(OEL) 동특성 시험”, 전기학회논문지 56권 8호, 2007

[4] WECC, “Guidelines for Over Excitation System Limiter (OEL) and Over Excitation Protection (OEP) Testing”, www.nerc.com/ regional/wecc.html, 2000

[5] 이주현, 임익현, 류호선, 신만수, 김준환, “전력계통 안정도 확보를 위한 발전기 무효전력 성능시험(1)”, 대한전기학회 하계학술대회 pp 190-191, 2006

[6] 임익현, 신만수, 이주현, 류호선, 김봉석, 송성일, “EX2000 제어 및 진단기법 개발(최종보고서)”, 한국수력원자력(주), pp 172-185, 2005

저 자 소 개



신 만 수 (申滿秀)

1970년 5월 10일생. 1996년 한양대 전기공학과 졸업. 2009년 충남대 박사과정 수료. 1995년~현재 KEPCO 전력연구원 선임연구원  
 Tel : 042-865-5648  
 Fax : 042-865-5609  
 E-mail : fullstone@kepco.co.kr



정 태 원 (鄭泰媛)

1948년 1월 28일생. 1970년 전북대 전기공학과 졸업. 1984년 연세대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1976년~현재 충남대 전기공학과 교수  
 Tel : 042-821-5653  
 Fax : 042-821-8895  
 E-mail : twjeong@cnu.ac.kr