

# 과도 안정도를 고려한 정지형 여자기의 새로운 설계기술

## New Technology of Static Excitation System Considering Dynamic Stability

류 홍우, 김 찬기  
( Hong-Woo Rhew, Chan-Ki Kim )

**Abstract** - A new generator excitation system using a boost-buck chopper as a kind of static exciter is proposed to overcome the lack of field forcing capability of the bus fed exciter under the input line fault condition. It increases or maintains the generator field current by boosting the field voltage in the case of the input AC line voltage drop during and immediately after a fault. The validity of the proposed excitation system is verified with the computer simulation. The generator stability according to the each difference exciter is tested using a commercial software package-CYME. The simulation results of the stability analysis on the generator with the proposed exciter is better than that of the bus fed exciter. This boost-buck chopper exciter can be simply implemented and controlled by the modern power electronics technology.

### I. 서론

발전기 여자시스템의 기본 기능은 동기기의 계자권선에 직류 전류를 공급하는 기능으로서 계자전압을 조정하여 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 만족스런 성능 구현에 필적인 보호 기능과 제어 기능을 수행하는 것이다. 발전기 여자시스템에 의한 제어 기능에는 전압 제어, 무효전력 제어 그리고 계통 안정도 향상을 포함하고 있으며, 보호 기능에는 동기발전기, 여자시스템과 타 설비들이 그들 자신의 능력 한계를 벗어나지 않도록 보호하는 기능을 포함하고 있다. 동기발전기의 관점에서 볼 때 첫째 여자시스템은 동기발전기가 연속 운전할 수 있는 범위 내에서의 출력 변화에 응하여 동기기의 계자전류를 자동 제어함으로써 단자전압을 유지할 수 있어야 한다. 두 번째로는 발전기의 순간적이고 단시간 능력(generator instantaneous and short-term capability)에 부합하는 계자강화(field forcing)를 수행함으로써 과도적인 외란에 대응할 수 있어야 한다. 이러한 관점에서 발전기의 능력은 높은 계자전압으로 인한 계자권선의 절연 파괴, 계자전류의 과다로 인한 과열, 부하전류의 과다로 인한 전기자 과열, 부족 여자에 의한 발전기의 철심 끝단(core end)부 과열과 전압 주파수비(V/Hz)의 증대로 과다 자속에 의한 과열 등으로 제한 받고 있다. 여자시스템을 가장 유용하게 활용하기 위해서는 동기발전기가 가지고 있는 이러한 한계를 초과하지 않도록 최대로 활용함으로써 계통의 요구에 부응할 수 있게 하는 것이다. 또한 전력계통과의 관점에서 여자시스템을 고려할 경우에는 전압의 효과적인 제어와 안정도 향상에 기여하여야 한다. 여자시스템은 과도 안정도(transient stability)를 향상시키도록 외란(disturbance)에 신속하게 응답할 수 있어야 하고 정태 안정도(small-signal stability)를 강화하도록 발전기 계자를 조절할 수 있어야 한다. 1920년대 초에는 연속, 속응 제

어를 사용할 경우 정태 안정도와 과도 안정도를 향상시킬 수 있다는 것을 인식하게 되었다. 여자시스템의 개발에 따라 속응 능력을 가진 여자시스템이 곧바로 산업계에 도입되었으며 이후 지속적으로 진보하고 있다. 1960년대 초 여자시스템의 역할은 발전기 단자전압 신호와 설정 값의 오차 신호에 부가하여 전력계통의 진동(system oscillation)을 억제하기 위해서 계자전압을 조정하는 보조 안정화 신호를 사용하는데 까지 확대되었으며 이러한 방식에는 발전기 단자전압을 적정 값으로 제어할 수 있도록 하는 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)[1],[3]와 송전단 전압을 적절히 제어하는 송전 전압 제어장치(Power System Voltage Regulator : PSVR)[3]가 있다. 최근에는 높은 정상 전압(ceiling voltage)을 갖는 초속응(instantaneous response) 여자 시스템이 실 계통에서 사용되고 있어 높은 계자강화 능력과 보조 안정화 신호의 조합으로 전력계통의 동적 성능 향상에 기여하고 있다. 동기발전기의 속응 여자를 위하여 정지형 여자시스템을 사용하고 있으나 가장 널리 사용되고 있는 전압원 정지형 여자시스템에서는 동기발전기 단자로부터 여자전원을 공급받음으로써 단자전압 변화의 영향을 직접 받아 계통 선로 사고시 안정된 여자전원의 확보가 어렵고 이를 개선한 컴파운드 정지형 여자시스템이 있으나 아직 검증받지 못하고 있다.

본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 계통의 선로사고로 인한 동기발전기 단자전압 저하시에도 일정 단자전압 변화 범위 내에서는 동기발전기의 정격 단자전압에서와 동일한 여자전원을 확보하고 그 이하에서는 전압원 여자시스템보다는 높은 계자전류를 공급할 수 있는 승강압 초과식 정지형 여자시스템에 대한 연구를 진행하였다. 본 논문에서 제안하는 승강압 초과식 정지형 여자시스템에 대한 연구 목적을 정리하면 다음과 같다.

- 1) 정상 운전 조건에서 기존의 정지형 여자시스템과 동급 이상의 성능 확보,
- 2) 발전기 단자전압 저하시의 과도 상태에서도 여자 전원 확보
- 3) 컴파운드 여자시스템에서처럼 변류기를 사용하지 않는 새로운 시스템.

본 논문에서는 이상의 연구 목표를 만족할 수 있는 승강압 초과식 정지형 여자시스템에 대한 연구를 수행하였으며 제안된 여자는 승압 효과와 강압 효과로 구성되며 승강압 효과간의 전력 전달은 직류 링크부를 이용하도록 하였다. 승압 효과는 정상 입력 상태에서는 동작치 않고 3상 다이오드 정류기로 전파 정류하여 여자전원을 공급한다. 그러나 동기발전기 단자전압 즉 여자 입력 전압이 저하하여 직류 링크부의 전압이 설정값 이하로 하강할 경우에는 승압 효과가 동작하여 입력 전압을 승압 시킴으로써 직류 링크부의 전압을 설정 값으로 유지될 수 있도록 제어한다. 강압 효과는 직류 링크부를 통하여 공급된 전원을 인가 받아 동기발전기 단자전압이 일정하도록 계자전류를 조정함으로써 기존 여자시스템의 역할을 담당하도록 하였다. 이 방식의 특징은 전압원 정지형 여자시스템의 특성을 그대로 유지하면서 동기발전기의 일정 범위 내에서의 단자전압 변화에는 충분한 계자강화 능력을 보유하게 된다. 또한 동기발전기 초기 전압 확립을 위하여 사용하는 초기 여자(field flashing)방식을 전압원 여자시스템에서는 일정 전압을 직접 발전기 계자권선에 인가하여 과도상태가 발생하고 있으나 이 방식에서는 전원을 직류 링크부에 인가하고 강압 효과에 의하여 제어되게 함으로써 부드러운 전압 확립이 가능하게 된다.

본 논문에서는 제안된 방안에 대한 타당성 및 구현 가능성을 입증하기 위하여 모의실험을 통한 검증이 이루어 졌으며 이를 토대로 직류 전동기에 의하여 구동되는 25KVA 동기발전기에 적용하여 실용성을 확인하였다. 안정도 향상에 대한 실험은 실 계통에 적용하여 실시하지는 못하였으나 상업용으로 사용되고 있는 안정도 해석 프로그램을 이용하여 검증하였다.

## II. 본 론

여자에 대한 이해를 돕기 위해서 현재까지 개발된 여자의 대표적인 종류를 크게 나누면 다음과 같다.

### 1. DC 여자 시스템.

교류 발전기가 최초로 출현하였을 때 계자시스템에 대한 전원 공급 장치로 직류 발전기를 이용한 직류 여자시스템이 사용되었다. 직류 발전기는 주 여자기(main exciter)나 부 여자기(pilot exciter)로 사용되었을 뿐 아니라 후에는 회전 증폭기 또

는 앰플리다인(amplidyne)으로 알려져 있는 제어 증폭기(control amplifier)로도 사용되었다. 직류 여자는 정류(commutation)와 브러시 장치(brush) 그 자체로서 뿐 아니라 이들로 인한 불꽃 발생 등으로 어려움을 겪어 왔으나 발전기 과도 상태에서의 성능 향상에 사용되는 양 방향 동일 출력 전압을 공급 할 수 있는 능력을 가진 특별한 장점도 갖추고 있다. 또한 주 여자의 전기자는 극성에 무관하게 폴 슬립핑(pole-slipping) 발생이나 기타 심각한 시스템 외란 기간 동안 발전기 계자권선에 나타나는 유도 전류의 정류(commutation)를 위한 통로를 제공함으로써 유도 전압을 제한한다. 직류 여자시스템은 1920년대로부터 1960년대에 걸쳐 사용되어 왔지만 브러시 장치와 정류에 따르는 불꽃 등의 문제에 의한 전류 공급의 제한으로 인하여 교류 여자시스템(AC excitation system)으로 대체되었다.

### 2. AC 여자 시스템

AC 여자시스템은 정지형 반도체 정류기를 이용하여정류된 직류를 슬립링(slip ring)을 통해서 발전기 계자권선에 공급하는 정류자 없는 교류 여자시스템(commutatorless excitation system)이거나 축 상에 설치된 회전 정류기를 통해서 직접 전류를 공급하는 브러시 없는 여자시스템(brushless excitation system)이 있다. 정지형 반도체 다이오드 정류기를 기본으로 한 교류 여자시스템이 직류 여자시스템의 첫 번째 대안이었다. 그러나 상대적으로 낮은 정격을 가진 다이오드를 사용한 초기 설비는 폴 슬립핑(pole-slipping)시의 역 전압(reverse voltage)에 견디기 위하여 최소 3개의 다이오드를 직렬 연결해야 하였다. 이러한 결과로 설계시 충분한 여유 용량을 갖도록 하는 문제가 있었으나 급속한 반도체 기술의 발달로 고전압, 전류에서 운전 가능하고 단순하며 더욱 간결한 반도체 소자의 출현으로 사용 수량의 감소를 가져옴으로써 다이리스터를 사용한 정지형 여자시스템(static excitation system)이 도입되었다.

### 3. ST 여자 시스템

반도체 소자 중 다이리스터(Thyristor)의 개발 활용과 함께 정지형 정류기의 역할이 급격히 변화하였다. 다이리스터 정류기는 발전기 계자에 공급하는 여자전력을 직접 제어할 수 있는 소자로서 다이오드와 같이 전류를 한 방향으로만 공급함과 아울러 다이오드와는 달리 공급 전류의 크기를 도통 시점 즉 점호각을 조절함으로써 제어할 수 있다. 여자전력의 크기는 다이리스터의 점호각을 제어함으로써 조정됨에 따라 동기발전기에 다이오드 전파 정류기를 사용하여 여자전력을 공급하기 위한 교류 발전기인 주 교류 여자기(main AC exciter)가 불필요하게 되었다. 이러한 주 교류 여자기(exciter)를 사용하는 시스템의 시정수에는 기본적으로 주 여자기 권선에 의한 시지연(time

delay)이 있기 때문에 이를 제거한다는 것은 여자시스템의 응답 시간을 빠르게 하고, 결과적으로 동기발전기의 과도 안정도를 향상시키게 된다.

#### 4. 여자 시스템과 안정도

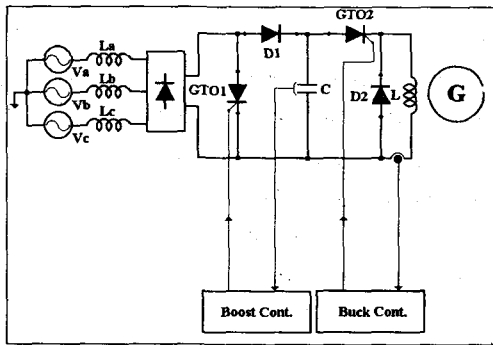
고성능의 여자시스템인 속응 여자시스템을 사용할 경우 정태 및 과도 안정도 향상에 기여한다는 것은 이미 잘 알려져 있는 사실이다[3],[5]-[13]. 따라서 여자시스템에 있어서 여자 전원의 안정적 확보와 속응 제어 능력이 중요한 요소로 작용하게 된다. 여자용 발전기인 여자기(exciter)를 사용하는 교류 여자시스템의 경우 독립된 전원을 확보하여 계통의 선로 사고와 무관하게 안정된 여자전력을 공급할 수 있다는 장점이 있으나 여자기를 사용함에 따른 시지연을 피할 수 없다. 정지형 여자시스템의 경우 보조 여자기를 사용하지 않기 때문에 여자기로 인한 시지연을 제거할 수 있으나 여자 전원을 일반적으로 동기발전기의 출력 단자에 연결된 여자용 변압기(Potential Power Transformer : PPT)를 통하여 공급받음으로써 정상 운전중이나 사고 기간 중에 동기발전기 출력 단자전압의 변화에 따른 영향을 직접 받게 된다. 여자용 변압기(PPT)는 송전선로의 지락 및 단락 사고 등으로 인한 사고 기간 중의 낮은 발전기 출력의 급격한 저하(load rejection)로 인하여 발생하는 높은 전압에도 견딜 수 있어야 한다. 동기발전기의 단자전압 변화에 의한 영향을 줄이기 위하여 동기발전기의 전압과 전류를 벡터 적으로 합성하여 여자 전원으로 사용하는 컴파운드 정지형 여자시스템(compound source excitation system)이 있다[1],[4]. 송전선로 사고에 의한 동기발전기 단자전압의 저하는 발전기 부하전류의 증가를 수반함으로써 전압의 저하에 반비례하여 부하전류는 증가하게 됨으로 이들 두 성분을 벡터 적으로 합성하여 여자전원을 확보하는 방식이다 이와 같이 정지형 여자시스템(static excitation system)에는 발전기 단자로부터 여자용 변압기(PPT)를 통하여 여자전원을 공급받는 전압원 정지형 여자시스템(bus fed excitation system)과 발전기 단자전압과 부하전류를 변압기(PPT)와 변류기(current transformer)를 이용하여 벡터 적으로 합성하여 여자전원으로 사용하는 컴파운드 여자시스템으로 크게 대별되고 있다. 전압원 정지형 여자시스템은 전력 전자 및 제어기술의 발달로 시스템이 단순하고 저렴한 것뿐 아니라 정비 보수가 용이하고 시 지연이 적은 초속응 여자기 가능하며 안정도를 향상시키는 이점이 있어 오늘날 널리 사용되고 있다. 특히 송전선로가 길거나 발전용량에 비하여 송전용량에 여유가 없는 등 상대적으로 선로 임피던스가 큰 선로를 가진 결합 능력이 약한 송전 계통일수록 여자시스템에 의한 안정도 향상이 크게 나타난다. 그러나 전압원 정지형 여자시스템은 전술한 바와 같이 발전기 단자전압의 변화가 여자기 특성

에 직접적으로 영향을 미치는 단점을 보유하고 있다. 정상 운전 상태에서의 발전기 단자전압의 변화는 다이리스터 제어 정류기의 점호각을 제어함으로써 여자전류를 확보할 수 있으나 전력계통의 선로 사고 등으로 발전기 단자전압이 허용 값 이하로 저하할 경우에는 발전기 단자전압이 정상 상태일 때와 동일한 여자 강화 능력을 확보할 수 없어 여자강화 능력이 저하하게 된다. 동기발전기 단자전압의 저하는 송전전력을 저하시킴과 동시에 최대 공급 가능한 계자전류를 저하시키게 되고 계자전류의 저하는 발전기 단자전압을 더욱 저하시킴으로써 기계적 입력과 전기적 출력의 불평형이 심화되어 전력 상차각(power angle)이 증대됨으로써 결국 동기 탈조하게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 컴파운드 전원 방식의 정지형 여자시스템을 개발하여 사용하고 있으나 대응량의 변류기를 설치하여야 하고 여러 형태의 선로사고에 대응한 제어정수의 정정을 행하기 어려움에 따라 성능에 대한 검증을 받지 못하고 있다. 또한 대형 리액터 제작의 곤란함으로 증소형기에서 채택되고 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 1988년 전기 전자 엔지니어 협회의 저널(IEEE Transaction)에 발표된 "이중 자여자 동기발전기의 해석(analysis of self-dual excited synchronous machine)"에서는 컴파운드 여자시스템의 변류기(current transformer)를 생략하고 동기발전기의 안정도를 향상시킬 수 있는 새로운 방식의 정지형 여자시스템을 제안하고 있다. S. WE. Abo-Shady 등 4명이 제안하고 있는 이 방식은 발전기에 두개의 계자권선을 사용하여 하나의 계자권선에는 전압원 정지형 여자기와 동일하게 동기발전기의 단자로부터 여자전원을 공급하고 다른 계자권선에는 외부 직류 전원을 사용하는 방식을 제안[18]하고 있으나 독립된 부하 계통에 전력을 공급하는 발전기에 대하여 검토한 것이다.

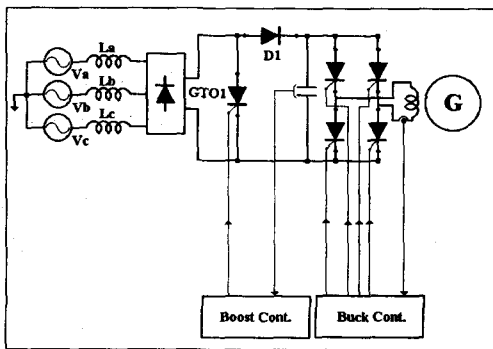
### III. 제안된 여자 시스템

그림 1은 본 논문에서 제안한 여자기 회로를 나타내고 있다. 제안된 여자기는 정상운전 조건에서 전압원 정지형 여자기와 유사한 동작특성을 가지지만 계통의 3상단락이나 지락과 같은 선로고장으로 인한 단자전압의 강하로 여자전류의 확보가 곤란한 경우에는 여자전류를 유지하거나 증가(field forcing)시키도록 승압 변환기(boost converter)를 이용하여 여자전압을 승압시키도록 동작한다. 정상 운전 조건에서는 싸이리스터 정류기가 강압 콘버터(buck-converter)로 작용하고 선로 고장등으로 인한 여자용 전원전압 저하시에는 다이오드 브리지로 동작케 함으로서 GTO (Gate Turn Off-Thyristor)와 같은 스위칭 소자와 다이오드 브리지 그리고 입력 리액터가 결합하여 승압 콘버터로 작용한다. 그림 1의 a)는 발전기의 전기자를 생략한 여자회로와 여자 시

시스템을 간략하게 표현한 것으로 강압 컨버터는 정상 운전조건하에서 발전기 단자전압을 제어하며 승압 컨버터는 고장 발생 즉시 필요에 따라 여자강화(field forcing)를 행한다. 또한 그림 1의 b)는 여자 시스템의 속응성을 높이기 위해서 강압컨버터로써 4상한 DC/DC컨버터를 채용한 것이다. 제안된 시스템과 기존의 전압원 정지형 여자기에서의 차이점은 다이오드 브리지와 스위칭 소자 그리고 교류 입력 리액터와 출력 캐패시터가 추가되어 있는 것이다. 입력 리액터는 입력 변압기의 누설 인덕턴스를 이용할 경우에는 별도 설치할 필요가 없으나 필요시에는 변압기와 강압 컨버터 사이에 삽입할 수 있다. 정상 운전상태에서 승압컨버터는 동작하지 않으며 여자전류는 입력 리액터와 싸이리스터 브리지를 통하여 공급되며 강압 컨버터의 점호각제어에 의해서 여자전류는 필요한 값으로 제어된다. 계통사고등으로 인한 입력전압의 저하로 여자전류를 확보할 수 없을 경우에는 다이오드 정류기 후단의 승압스위칭 소자는 콘덴서전압을 지령한값으로 유지 하기위해서 스위칭을 시작한다. 이때 스위칭 듀티 사이클은 발전기 출력전압강하에 비례한다. 승압 스위칭 소자가 폐로되는 동안 3상입력전원 측에 있는 리액터 전류는 증가하면서 에너지를 리액터에 저장하고 개로되어 있는 동안은 리액터에 저장되어 있는 에너지를 계자권선과 강압 컨버터의 출력단 캐패시터에 전달한다.



A)



B)

그림 1 승강압형 정지형 여자기

Fig. 1. Boost-buck exciter.

IV. 컴퓨터 모의시험

본 논문에서 제안한 시스템의 타당성을 검증하기 위해서 회로해석 프로그램인 PSIM을 이용하여 부록 A에 주어 있는 여자기 파라미터를 사용하여 IEEE std 421.2-1992[1]에 있는 소 신호 성능실험(Small Signal Performance Test)을 기준하여 제안된 회로와 전압원 정지형 여자기를 대상으로 몇가지 단위응답 실험에 대한 모의 실험을 실시하였으며 단위응답 실험의 기준 값은 발전기 무부하상태에서 정격전압을 유지하기 위한 여자전류를 사용하였다.

4-1. 단위응답 모의 실험

4-1.1 전압원 정지형 여자기

그림 2는 제안된 여자 시스템의 성능을 평가하기위해서 비교대상인 전압원 정지형 여자기의 모의 실험 회로를 나타내고 있으며 그림 3~5에는 이러한 모의실험 결과를 보여주고 있다. 그림 3과 4에서는 전압원 정지형 여자기가 무부하시 기준값에서 10% 여자전류상승 및 하강에 대한 단위응답 실험결과를 보았다. 또한 그림 5는 시스템의 고장상태를 가정하여 여자기의 입력전압이 트립 임계전압 이하가 인가된 경우에 여자 시스템의 계자전류를 보여주고 있다.

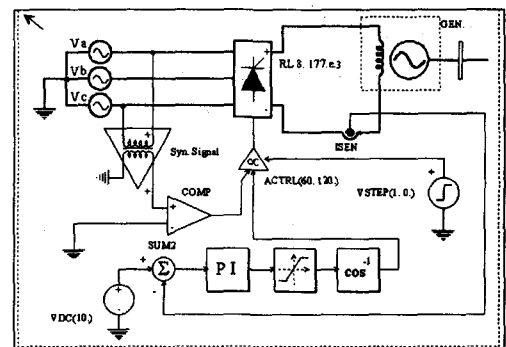


그림 2 전압원 정지형 여자기의 모의실험회로  
Fig. 2. Simulation circuit of the bus fed exciter

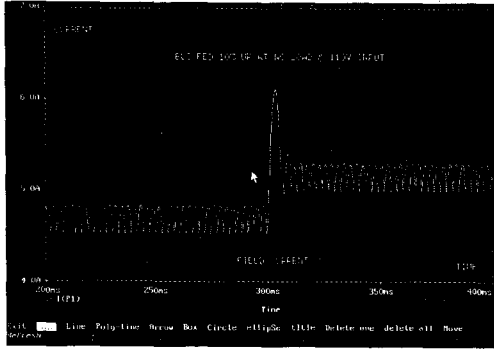


그림 3 전압원 정지형 여자기의 10% 여자 전류상승 단위응답 모의실험 결과(무부하시)  
**Fig. 3.** Simulation Result of 10% current step-up response of the bus-fed exciter. (No-load)

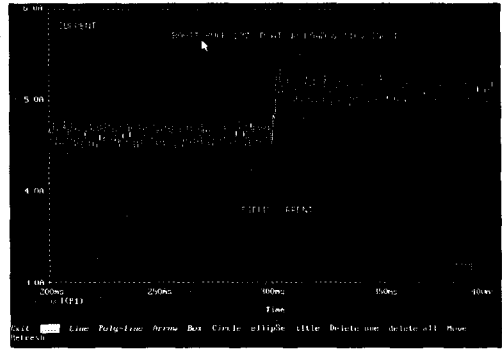


그림 6 승강압형 여자기의 10% 여자전류상승 단위응답 모의실험 결과(무부하시)  
**Fig. 6** Simulation result of 10% current step up response of the boost-buck exciter.(no-load)

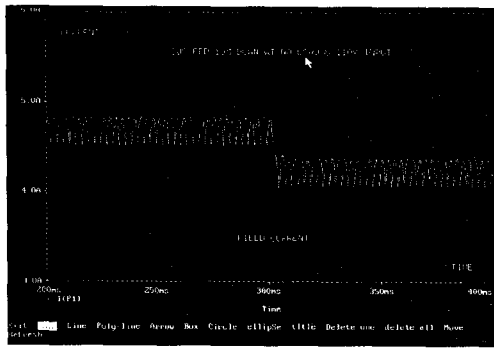


그림 4 전압원 정지형 여자기의 10% 여자전류 하강 단위응답 모의실험 결과(무부하시)  
**Fig. 4.** Simulation result of 10% current step down response test of the bus fed exciter. (No-load)

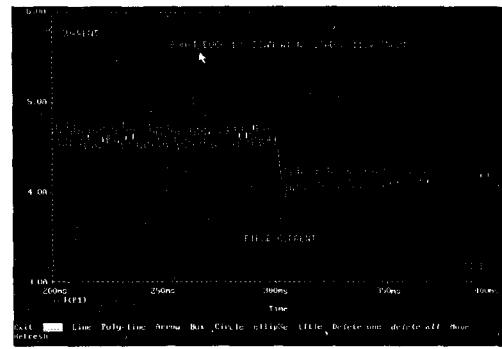


그림 7 승강압형 여자기의 10% 여자전류 하강 단위응답 모의실험 결과(무부하시)  
**Fig. 7** Simulation result of 6% current step down response of the boost-buck exciter.(no-load)

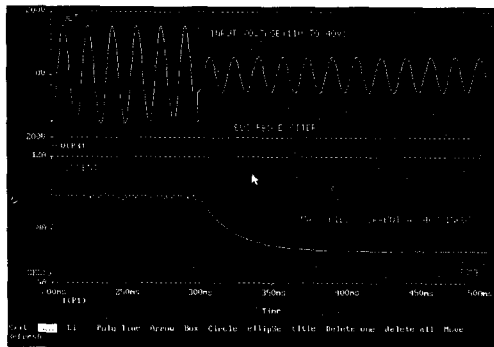


그림 5 전압원 정지형 여자기의 기저 입력전압에서 최대공급 계자전류.  
**Fig. 5.** Maximum field current at low level input voltage in bus-fed excitation

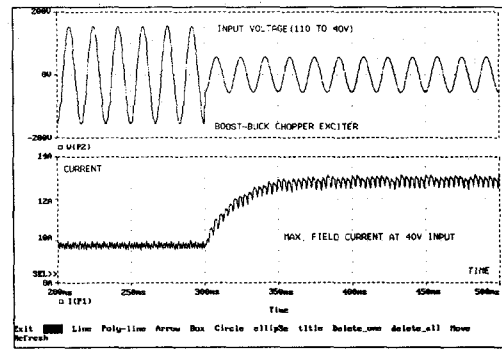


그림 8 승강압 정지형 여자기의 기저입력전압에서 최대공급 계자전류  
**Fig. 8.** Maximum field current at low level input voltage in boost-buck excitation

#### 4-1.2 승강압 정지형 여자기

그림 6과 7은 그림 1 A)에서 보여주는 승강압 정지형 여자기에 대한 10%의 여자전류 단위응답에 대한 모의 실험 결과를 보이고 있으며 그 결과는 전압원 정지형 여자기와 유사하다.

그림 8에서 보는 바와 같이 승강압 여자기는 그림 5와 비교해서 시스템의 트립 임계 고장전압이 시스템에 인가되도록 승압초퍼에의해서 시스템의 고장에 대한 대응능력이 우수함을 알 수있다. 한편 제안된 여자기는 입력전압이 이 값 이

하로 하강할 경우에는 발전기 최대 여자전압  $V_{MAX}$  ( $V_{MAX} = K_p \cdot V_T$ )의 저하에 비례하여 여자전류는 감소하게 되지만 같은 조건에서의 전압원 정지형 여자기와 비교할 때 승압 컨버터의 작용으로 보다 큰 전류가 된다. 따라서 승강압 정지형 여자기와 전압원 정지형 여자기의 기준전류에 대한 여자전류 단위응답 모의 실험결과는 거의 유사하다. 이는 두 여자시스템이 실 계통에서의 정상운전 상태에서도 그 특성이 유사하다는 것을 의미하고 있다. 그러나 발전기가 3상단락이나 지락과 같은 고장이 발생한 경우에는 두 여자기의 운전특성은 승강압 정지형 여자기의 승압작용으로 인하여 차이가 발생하게 된다. 입력전압의 변화에 대한 여자기의 공급 가능한 최대 여자전류를 모의실험 결과를 기준으로 구하면 표 1과 같다. 승강압 정지형 여자기의 공급 가능한 최대 여자전류는 동일한 입력전압에서 전압원 정지형 여자기에 비하여 전체적으로 약 180%나 증가하고 있다. 이는 제안된 여자기의 기존의 전압원 정지형 여자기에 비하여 보다 큰 여자강화(field forcing) 능력을 보유하고 있다는 것을 모의실험 결과로부터 확인할 수 있다. 승압으로 인한 최대 공급전류는 전압원보다 상당히 증가함을 알 수 있지만 실제 계통에서는 강압, 승압 변환기의 제어분담으로 인하여 일부 제한을 받게 된다.

표 1 입력전압 변화에 따른 최대 여자전류 모의 실험 결과

Table 1 The current simulation results depending on input voltage variation

Input volts [V]	110	70	60	50	35	20	10
Bus Fed [A]	18	11.3	9.7	8.1	4.8	3.2	1.6
Boost-Buck[A]	18	18	18	15	10.2	6.0	3.0

4-2. 안정도 모의실험

4-2장에서 본 논문에서 제안한 시스템이 계통에 연계된 경우를 가정하여 안정도 해석을 행하였으며 안정도 해석에 이용한 프로그램은 전력계통 안정도 해석 프로그램인 CYME를 이용하였다. 전압원 방식의 정지형 여자기의 모델은 IEEE Std. 421.5-1992[8]에 있는 것을 사용하였으며 승강압 정지형 여자기의 모델은 전압원 정지형 여자기를 기본 모델로 하여 CYMSTAB-UDM[9]을 이용하여 컴퓨터 모의 실험회로 해석 결과에 맞게끔 작성하였다. 사용 모델에서 전압원 정지형 여자기와 승강압 정지형 여자기의 차이는 입력전압에 대한 여자전압의 최대 값이 입력전압의 변화에 따라 차이가 있다는 것이다. 승강압 정지형 여자기의 여자전압 최대 값  $V_{MAX}$ 는 컴퓨터 모의 실험 값을 사용하였기 때

문에 입력전압이 56%이상일 경우에는 전압원 정지형 여자기의 최대전류 이상으로 여자전압을 유지할 수 있으며 이하로 하강할 경우에는 단자전압에 비례하여 표 1과 같이 저하하게 된다. 이 모의실험에 사용한 여자기별 모델정수는 부록 B와 같다. 그림 9는 CYME사에서 DEMO용으로 제공하는 가상의 전력 계통도이며 이를 대상으로 두 가지 선로 고장의 경우에 대하여 모의 해석하였다.

○ 삼상 단락고장이 OTAWA모선에서 발생하고 10[Hz]후에 고장이 해소된 경우

○ OTAWA 모선에서 임피던스 0.015를 갖는 선로 단락이 발생하였으며 [10Hz]후에 고장이 해소된 경우

발전기 전력 각(power angle)의 기준 모선은 OTAWA모선 7002를 사용하였으며 IAIPU 3 발전소 12번 발전기를 대상으로 여자기를 교체 투입하면서 모의해석을 실시하였다.

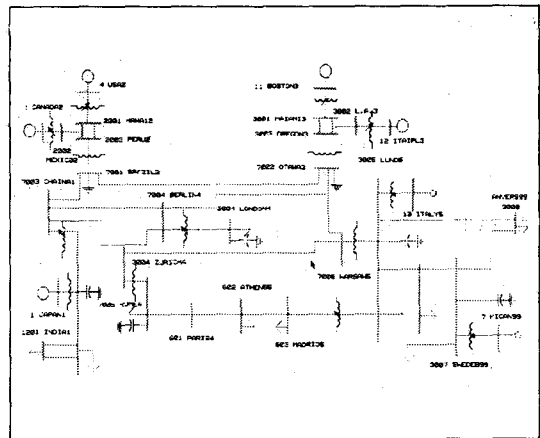


그림 9 안정도 해석을 위한 가상 전력계통.

Fig. 9. Fictitious network for stability simulation.

4-2.1 3상 단락 고장시의 안정도 해석

3상 단락고장에 대하여 그림 10은 승강압 정지형 여자기와 전압원 정지형 여자기의 모의해석 결과를 보이고 있으며 그리고 그림 10, 11, 12는 각각에 대한 발전기의 단자전압과 계자전류의 변화상태 그리고 전력상차각의 변화를 보이며 본 논문에서 제안된 승강압형의 여자강화(field forcing)가 큰 것을 알 수 있다. 직은선인 1번선이 제안된 여자기이고 열은선인 2번선이 전압원에 대한 것으로 승강압형 여자기보다 안정도 향상에 기여하는 것을 알 수 있다.

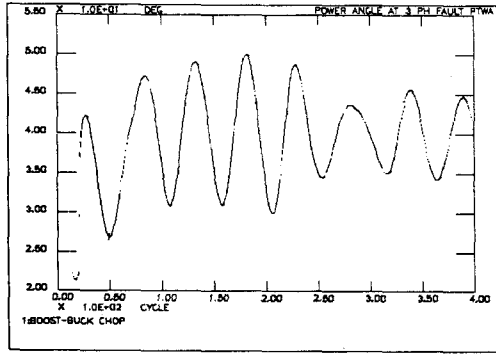


그림 10 3상단락 사고후 10사이클후에 모선에서 불리된 경우 발전기 전력 상차각 변화

Fig. 10. Power angle at 3 phase short circuit fault cleared after 10 cycles. (bus-fed, boost-buck)

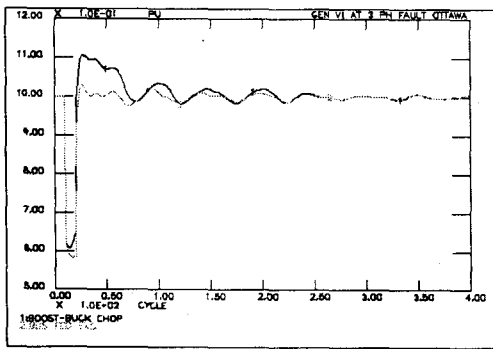


그림 11. 3상단락 사고후 10사이클후에 모선에서 불리된 경우 승강압형 여자에 대한 발전기 단자전압.

Fig. 11. Generator terminal voltage at 3 phase short circuit fault cleared after 10 cycle.(buck-boost, bus-fed)

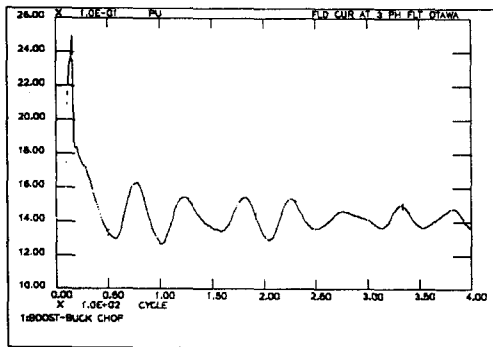


그림 12 3상단락 사고후 10사이클후에 모선에서 불리된 경우 승강압형 여자에 대한 발전기 계자전류의 변화.

Fig. 12. Generator terminal voltage at 3 phase short circuit fault cleared after 10 cycle. (buck-boost, bus-fed)

4-2-2 선간단락 고장에 대한 안정도

OTAWA 모선에서 임피던스가 0.015를 갖는 선간단락 발생 시의 안정도해석 결과를 그림 13에 보이고 있으며 여자강화 특성은 승강압형이 높다. 모의해석 결과는 3상단락 사고시의 안정도 해석결과와 동일하게 승강압형 정지형 여

자가 안정도에 대한 기여도가 높은 것을 알 수 있다.

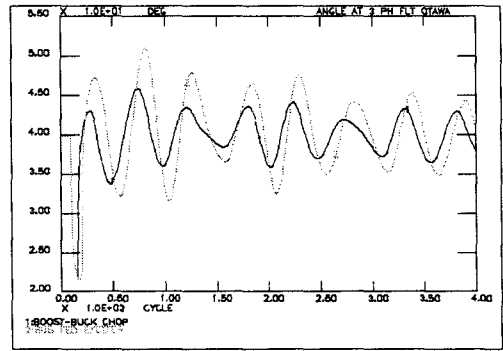


그림 13 선간단락 사고후 10사이클후에 모선에서 불리된 경우 발전기 전력 상차각 변화

Fig. 13. Power angle at line fault cleared after 10 cycles. (bus-fed, boost-buck)

V. 실험 결과

본 논문에서는 이상에서 모의실험으로 논한 승강압 정지형여자의 타당성을 검증하기위해서 그림 1의 A)와 같은 승강압 정지형 여자를 직류 전동기에 의하여 구동되는 25KVA 동기 발전기를 대상으로 축소 실험을 실시하였다. 이 발전기 파라미터는 부록 A에 주어진 파라미터로써 모의 실험에 사용하였던 파라미터와 동일한 값이다.

그림 14과 15는 무부하 정격전압에서 전압원 정지형 여자의 발전기 단자전압의 10%상승 및 하강 단위응답 실험결과를 보인다. X축은 시간축이며 Y축은 발전기 단자전압을 나타내고 있다.

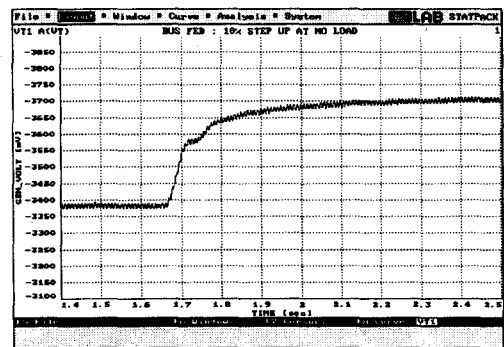


그림 14 전압원 정지형 여자의 10% 발전기 단자전압 단위응답 실험(상승)

Fig. 14. 10% generator voltage step up response test of the bus-fed exciter.

그림 16과 17은 무부하 정격전압에서 전압원 정지형 여자의 발전기 단자전압의 10%상승 및 하강 단위응답 실험결과를 보이며 그 응답특성이 전압원 정지형 여자의 응답 특성 보다 나은 결과를 보여 주고 있다. 그림 18과 19는 100%부하상태에서 여자기 입력전압을 10% 상승과 하강 실험

험을 행한 결과를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 시스템이 무부하 실험결과와 마찬가지로 전압원 정지형 여자기보다 과도 응답특성이 우수함을 알 수 있다.

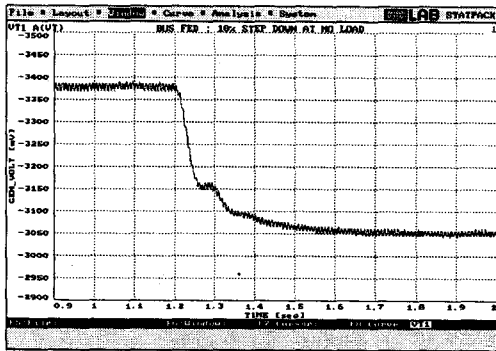


그림 15 전압원 정지형 여자기의 10% 발전기 단자전압 단위응답 실험(하강)  
**Fig. 15.** 10% generator voltage step down response test of the bus-fed exciter.

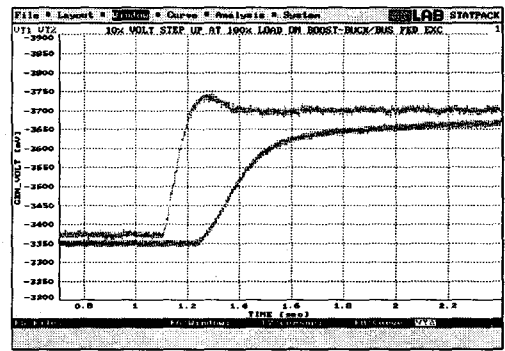


그림 18 100%부하에서 10% 전압 단위하강 (왼쪽: 승강압, 오른쪽: 전압원)  
**Fig. 18.** 10% voltage step down test at 100% load.(left Boost-Buck, right : Bus- fed)

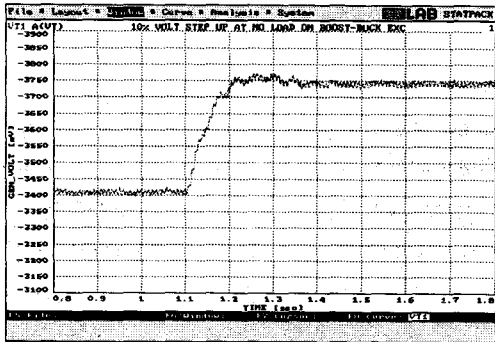


그림 16 승강압 정지형 여자기의 10% 발전기 단자전압 단위응답 실험(상승)  
**Fig. 16.** 10% generator voltage step up response of the buck-boost exciter

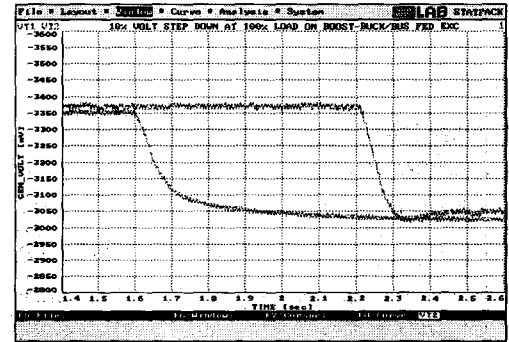


그림 19 100%부하에서 10% 전압 단위하강 (왼쪽: 승강압, 오른쪽: 전압원)  
**Fig. 19.** 10% voltage step down test at 100% load.(left Boost-Buck, right : Bus- fed)

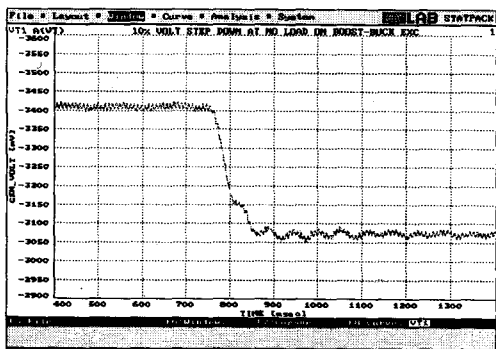


그림 17 승강압 정지형 여자기의 10% 발전기 단자전압 단위응답 실험(하강)  
**Fig. 17.** 10% generator voltage step down response of the buck-boost exciter

## VI. 결론

본 논문에서는 선로 고장 등에 의한 발전기 단자전압의

변화로 정지형 여자기 여자전원용 전원전압이 저하할 때 기존의 전압원 여자기에 비하여 안정도를 향상시킬 수 있는 새로운 방식의 승강압 정지형 여자기를 제안하였다.

제안한 승강압 정지형 여자기는 정격 입력전압 보다도 낮은 전압에서도 승압 변환작용에 의하여 전압원 여자기의 최대전류와 동일한 여자전류를 공급할 수 있을 뿐 아니라 그 이상의 전압에서는 전압원 정지형 여자기에 비하여 보다 큰 전류를 공급할 수 있다. 제안된 승강압 정지형 여자기는 기존의 전압원 정지형 여자기에 비하여 몇 개의 소자만을 추가함으로써 이루어지며 정상조건에서는 전압원 여자기와 동일하게 동작하지만 선로고장으로 여작용 입력전압이 저하하는 경우에만 승압 컨버터에 의해서 여자전압을 승압 시켜 필요한 여자강화(field forcing)를 행할 수 있다. 컴퓨터 모의 실험과 축소모델을 이용한 실험실 실험을 통하여 제안된 여자기의 운전특성을 검증하였으며 상업용 안정도해석 프로그램인 CYME을 이용하여 가상 전력계통을 대상으로 전압원 정지형 여자기, 승강압 정지형 여자기에 대하여 3상단락 고장과 선간단락 고장에 대하여 발전기의 전력각 변화를 기준



으로 안정도해석을 실시하였으며 그 결과 본 논문에서 제안한 여자기의 안정도 측면에서 가장 우수함을 보여있음을 보여주었다.

**VII. 참고 문헌**

[1] ANSI/IEEE Std. 421.1 1986, "An American National Standard/IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines."  
 [2] J.J. Arnold, J.R. Capener, "Modern Power Station Practice, British electricity International, London: Volume C turbine Generators and Associated plant Pergamon Press 1991, P504 - 555  
 [3] "Specification and Characteristics of Synchronous Generator Exciters", JIEE Technical Report No.536, 2. 1995.  
 [4] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., New York, 1994, P315 - 340.  
 [5] General Electric, "Power System Stability Lecture Note of 1979/1980 Power System Engineering Course."  
 [6] Brown Boveri Review, NO. 9/10,1974, "Series Compounding of Self-Excited Synchronous Generator."  
 [7] S.E. Abo-shady, F.I.Ahmed, S.M. El-Hakim, M.A. Badr, "Analysis of self-dual excited synchronous machine", IEEE trans. on Energy conversion, vol.3, No.3, June 1988  
 [8] IEEE Std. 421.5 1992, "IEEE recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies," Approved March 19, 1992.  
 [9] CYME International Inc.. "User Guide and Reference Manual (CYMEFLOW,CYMESTAB)," March, 1995.

**부록 A**

Gen. Cap.	25 KVA	Field Volt	100 V
Gen. Volt	220 V	Field Curr.	10 A
Gen. Curr.	65.6 A	Field Res.	8 Ohm
Phase	3	Field Induc.	177 mH
Exciter AC Input Volts	110 Vac		

**부록 B : The model data of the exciters**

- 1) The compound source exciter  
 $K_A=120.0 \quad T_A=0.15 \quad K_E=1.0 \quad T_E=0.5$   
 $K_C=0.65 \quad K_F=0.02 \quad T_F=0.56 \quad V_{MAX}=1.2$   
 $V_{MIN}=-1.2 \quad E_{FDMAX}=3.55 \quad K_P=1.19 \quad K_I=1.62$
- 2) The bus fed exciter  
 $T_R=0.02 \quad K_A=200 \quad T_A=0.0 \quad V_{MAX}=7.0$   
 $V_{MIN}=-6.4 \quad T_F=1.0 \quad K_P=7.0$

- 3) The buck-boost exciter

$$T_{A1} = T_{A2} = 0.0$$

$$V_{MAX} = K_P \cdot V_T \quad K_P = 14.0$$

Other data : same as the bus fed



**류 홍 우 (柳 洪 雨)**

1948년 출생., 1972년 2월 명지대학교 전기공학과 졸업, 1988년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업, 1996년 8월 서울대학교 전기공학과 졸업(박사), 1967년 한전입사, 1983

년 전력연구원 계통연구실 근무. 현재 한전 전력연구원 기술센터 자동제어그룹 수석연구원. 주요 관심분야 : 발전기 여자시스템, 컨버터, 인버터 시스템.



**김 찬 기 (金 燦 起)**

1968년 출생. 1991년 2월 서울 산업대학 전기공학과 졸업. 1993년 2월 중앙대 대학원 전기공학과 졸업. 1996년 2월 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 : 한전 전

력연구원 선임연구원. 주요 관심분야 : 현대 제어이론, 전동기 서브제어, PSS, AVR