

원자력 발전소용 정지형여자기 싸이리스터 컨버터 분석 및 시뮬레이션

조영식, 김복렬, 차한주\*  
 한국원자력안전기술원, \*충남대학교

Analysis and simulation of thyristor converter in static exciter for nuclear power plant

Youngsik Cho, Bokryul Kim, Hanju Cha\*,  
 Korea Institute of Nuclear Safety, \*Chungnam National University

**Abstract** - 국내 원자력발전소의 주발전기에 사용되는 정지형 여자기를 종류별로 구분하여 분석하였으며 특히 여자기의 주종을 차지하는 정지형 여자기 싸이리스터 컨버터의 전류제어기를 분석하고 시뮬레이션을 수행하여 계단응답 특성을 고찰하였다.

1. 서 론

발전기는 자계내의 도체가 자계와 상호운동을 하면 그 상대속도와 자속의 크기에 비례하는 기전력이 도체에 유도된다는 원리를 이용한 설비로 실제 원자력발전소의 주발전기는 도체를 고정자에 배치시켜 두고 회전자에서 자계를 형성시키며 터빈을 이용 회전자를 회전시키는 형태이다. 이때 자계를 형성시키기 위해 회전자 권선에 전류를 공급하기 위하여 필요한 설비를 통칭하여 여자시스템(Excitation System)이라 한다. 이러한 여자시스템의 기본기능은 동기기의 계자권선에 직류전류를 공급하는 기능으로서 계자전압을 조정하여 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 만족스런 성능구현에 필수적인 보호기능과 제어기능을 수행하는 것이다.[1] 본 논문에서는 우리나라 원자력발전소용 여자시스템에 관해 종류별로 분석하고 이 중 가장 많이 사용되고 있는 정지형여자기의 싸이리스터 컨버터에 대해서는 회로해석프로그램인 PSIM을 이용 시뮬레이션을 수행하여 계단응답결과를 통해 그 특성을 고찰하였다.

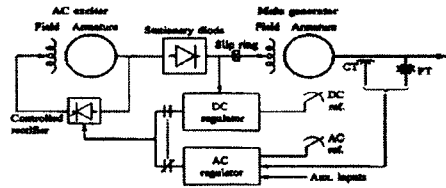
2. 원자력발전소용 여자시스템

원자력 발전소용 주발전기의 여자시스템은 일반적으로 여자전원 공급설비, 정류기(Rectifier), 브러쉬(Brush) 및 슬립링(Slip-ring), 자동전압조정기(Automatic voltage regulator, AVR) 등으로 구성된다.[2] 여자전원 공급설비는 주발전기 출력전압의 일부를 여자용 변압기를 이용하여 받는 방식과 직류발전기를 이용 발전하여 주발전기의 회전자권선에 공급하는 방식이 있다. 정류기는 여자용 변압기 또는 직류발전기로부터 공급되는 교류전원을 직류로 변환 공급하는 설비이다. 브러쉬 및 슬립링은 여자계통의 형태에 따라 없을 수도 있는데 회전자권선과 외부 고정체간을 연결 즉, 외부전원을 회전자권선에 연결할 때 사용하는 설비이다. 또한 여자시스템의 핵심부위라 볼 수 있는 자동전압조정기는 주발전기의 회전자권선에 공급되는 전류를 제어하여 최적의 자계를 형성시켜 주발전기의 단자전압을 일정하게 유지시켜주는 설비이다. 발전기 여자계통의 종류는 여러 가지가 있으나 대체적으로 여자전류 공급방법 및 여자전원의 종류에 따라 다음과 같이 분류할 수 있다.

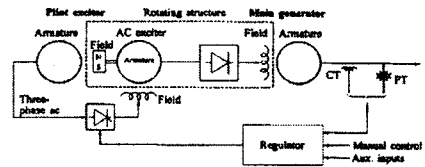
2.1 여자전류 공급방법에 의한 분류

여자전류의 공급방법에 따라 정류자(commutator)방식

과 그림 1 (a)의 비정류자(commutatorless)방식으로 구분되며 정류자방식은 발전기의 자계를 형성시키기 위해서 회전자권선에 직류전원이 필요한데 이 전원을 직류를 발생시키는 DC여자기로 공급하는 방식을 말한다. DC여자는 200MW급까지 소규모 발전기에서는 지금까지 사용되어 왔으나 발전기 용량이 증가되면서 여자전원의 용량도 증대되어 잘 사용되지 않는다. 비 정류자방식은 직류여자방식에서와 같이 정류자를 사용하지 않기 때문에 비 정류자방식이라고 하며 최근 대용량 발전기의 표준 사양으로 채택되고 있다. 이 방식은 여자변압기 또는 여자용발전기 출력을 정류기를 사용하여 정류하거나 또는 싸이리스터를 이용하여 정류 및 제어를 하여 발전기의 회전자부에 위치한 회전자권선에 직류를 공급한다. 이것은 다시 브러쉬의 사용유무에 따라 브러쉬(brush)방식과 그림 1 (b)의 브러쉬리스(brushless)방식으로 나눌 수 있다. 브러쉬방식은 여자용 변압기 또는 여자용 발전기에서 정류기를 통과면서 생성된 DC전류를 발전기 회전자권선에 공급하기 위하여 브러쉬와 슬립링을 이용하는 방식을 말하고, 브러쉬리스방식은 여자용 발전기 즉 여자기를 회전 전기자형을 사용하여 여자기 출력을 같은 축에 원주상으로 배열된 반도체 정류기 즉, 회전정류기에 연결하여 정류하고 그 출력을 발전기 회전자부에 위치한 회전자권선에 공급함으로써 브러쉬와 슬립링이 없는 방식을 말한다.[3]



(a) Commutatorless방식



(b) Brushless방식

그림 1. 여자전류 공급방식에 의한 분류

2.2 여자전원 종류에 의한 분류

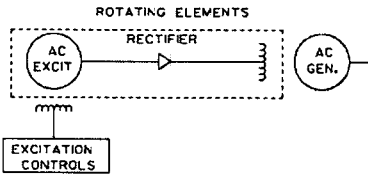
여자전원의 종류에 따라 직류여자방식과 교류여자방식으로 분류한다.[4]

### 2.2.1 직류여자방식(DC excitation system)

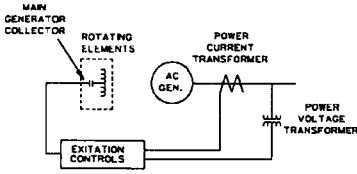
직류여자방식은 여자전원으로써 직류발전기를 이용하여 슬립링을 통해 동기발전기에 전류를 공급하는 방식으로 이 방식은 1920년부터 1960년대까지 많이 사용되었으나 현재는 교류회전형 여자시스템이나 정지형 여자시스템으로 대체되어 거의 사용되지 않는다.

### 2.2.2 교류여자방식(AC excitation system)

교류여자 방식은 교류발전기의 출력을 반도체 정류기를 이용하여 정류하여 주발전기의 계자에 전류를 공급하는 방식으로 여자용 발전기의 회전유무에 따라 회전형 그림 2 (a)와 정지형 그림 2 (b)로 나눌 수 있다.



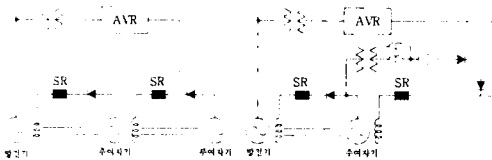
(a) 회전형 여자방식



(b) 정지형 여자방식

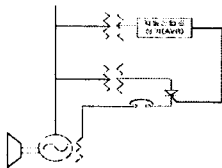
그림 2. 여자용 발전기의 회전유무에 따른 분류

이를 세분하면 여자기 계자권선에 공급하는 여자전원을 영구자석 발전기 등의 부여자기의 출력을 이용하는 방식인 그림 3 (a)의 타 여자식, 발전기 계자권선에 전원을 공급하는 여자기의 전원을 여자기 출력의 일부를 분권으로 사용하는 방식인 그림 3 (b)의 분권 자여자식 및 타여자 방식과 분권 자여자 방식에서와 같이 발전기 계자권선에 공급하는 전원을 여자용 발전기에서 얻는 것이 아니라 발전기 출력단 또는 계통모선에서 여자용 변압기를 통해 정지형 싸이리스터 정류 및 제어회로에 공급되고 이의 출력을 브러쉬와 슬립링을 통해 발전기 회전자부에 위치한 계자권선에 공급하는 방식인 그림 3 (c)의 싸이리스터 직접여자방식으로 나눌 수 있다.



(a) 타 여자방식

(b) 분권자여자 방식



(c) 싸이리스터 직접여자방식

그림 3. 계자권선의 전원공급 방식에 따른 분류

또한 정지형과 회전형에 대한 간단한 상호 비교결과는 아래 표 1과 같다.

표 1. 정지형과 회전형 여자기 비교

형식	선호도	비용	유지관리	응답	손실
정지형	High	High	Normal	Fast	High
회전형	Low	Low	Easy	Slow	Low

### 3. 정지형 여자기 싸이리스터 컨버터

국내 원자력발전소용으로 사용되고 있는 여자기의 대부분은 정지형 싸이리스터 여자방식을 사용하고 있으며 여자기 형식의 호기별 비교결과 및 정지형 싸이리스터 컨버터에 대한 시뮬레이션 결과는 다음과 같다.

#### 3.1 원자력 발전소 호기별 여자기 형식

국내 가동 중인 20개 원전의 호기별 여자기 형식은 다음 표와 같으며 일부 호기에 사용되고 있는 회전형 여자기는 2013년까지 모두 정지형으로 교체될 예정이다.

표 2. 호기별 여자기형식 비교

호기	여자기	AVR	제조사	설치년도
고리1	정지형	디지털 3중화	두산 (DS-DEX)	2005
고리2	회전형	아나로그 2중화	GEC	1983
월성1	정지형	디지털 3중화	Parsons	1983
월성2	정지형	디지털 3중화	GE (EX2000)	1997
영광1,2	정지형	디지털 3중화	두산 (DS-DEX)	2007
영광3,4	회전형	아나로그 단일형	GE	1995 1996
울진1,2	회전형	아나로그 2중화	Alsthom	1988 1989

주) \* : 고리3,4호기와 동일

\*\* : 월성3,4, 영광5,6, 울진3,4,5,6호기와 동일

#### 3.2 시뮬레이션 결과

국내 가동 중인 원전의 대부분이 채택하고 있는 정지형 여자기의 싸이리스터 컨버터 관해서 PSIM을 이용 시뮬레이션을 수행하여 계단응답 특성을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 호기인 울진 5,6호기의 여자기의 주요 파라미터는 다음 표 3에, 그림 4는 시뮬레이션 하고자 하는 여자기의 일부분인 3상 전파 싸이리스터 정류회로를 나타내며 그림과 같이 R-L부하인 경우 출력전류가 연속이면 출력전압 평균값( $V_0$ )은 지연각  $\alpha$ 의 값에 무관하게 되고 식 1과 같이 된다.[5]

표 3. 여자기의 회로정수

파라미터	정격
제조사/형식	GE/EX-2000
정격	3,855kW, 555Vdc
전부하 계자전류	6,308A
무부하 계자전류	2,362A
계자저항(at 125°C)	0.0864Ω
입력전압	660Vac, 60Hz
정류기형식	3상전파 싸이리스터 정류
정류기 수	5 브리지
싸이리스터 수	6개/브리지 × 5브리지
제어전원	115/120Vac, 125Vdc

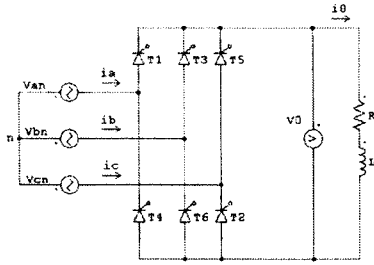


그림 4. 3상 전파 위상정류회로

$$V_0 = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} v_{ab} d(\theta t) = \frac{3}{\pi} \int_{\alpha+60}^{\alpha+120} \sqrt{2} V \sin \omega t d(\theta t)$$

$$= \frac{3\sqrt{2} V}{\pi} \cos \alpha \approx 1.35 V \cos \alpha \quad (1)$$

모델링을 위한 블록선도 및 전달함수는 그림 5 및 식 (2), (3)과 같다.

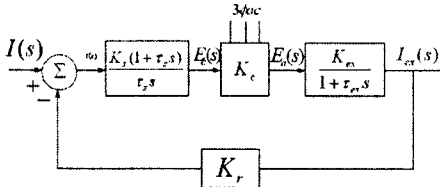


그림 5. 블록선도(Block Diagram)

$$\frac{I_{ex}(s)}{I(s)} = \frac{\frac{K_{ex} \cdot K_c \cdot K_s (1 + \tau_s s)}{\tau_s s (1 + \tau_{ex} s)}}{1 + \frac{K_r \cdot K_{ex} \cdot K_c \cdot K_s (1 + \tau_s s)}{\tau_s s (1 + \tau_{ex} s)}} \quad (2)$$

$K_r \cdot K_{ex} \cdot K_c \cdot K_s \gg 1$  인 경우에

$$\frac{I_{ex}(s)}{I(s)} = \frac{1}{K_r} \cdot \frac{(1 + \tau_s s)}{1 + \tau_s s + \tau_s \tau_2 s^2} \quad (3)$$

$$\text{여기서, } \tau_2 = \frac{\tau_{ex}}{K_r \cdot K_{ex} \cdot K_c \cdot K_s}$$

다음 그림 6은 시뮬레이션을 위한 회로도이며, 표 3의 회로정수를 이용한 사이리스터 컨버터의 계단응답 특성에 관한 시뮬레이션 결과를 그림 7에 나타내었다.

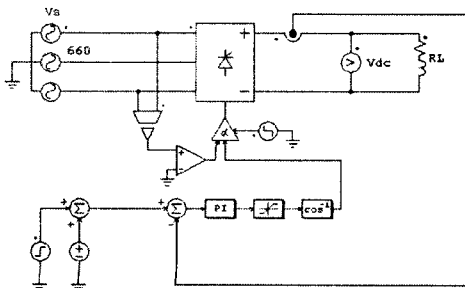
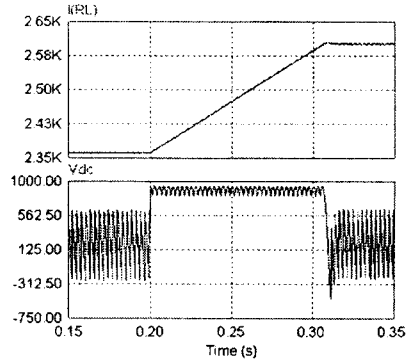
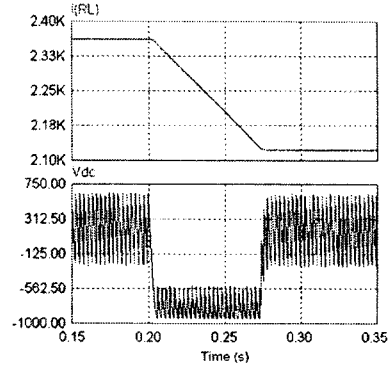


그림 6. 사이리스터 컨버터의 실험회로도



(a) 상승신호 시의 응답파형



(b) 하강신호 시의 응답파형

그림 7. 계단응답 특성

#### 4. 결 론

본 논문은 각종 여자기에 관해 종류별로 분석하고 이중 원자력발전소에 주로 사용되는 정지형 여자기의 사이리스터 컨버터에 관해서는 회로분석시뮬레이션 PSIM을 이용한 계단응답 결과를 통해 응답특성을 고찰하였다. 그 결과 여자전류 변동에 따른 응답특성은 매우 양호하게 나타났음을 알 수 있었다. 다만, 본 논문에서 다루지 못한 발전기 및 전력계통을 연계한 시뮬레이션해석에 관해서는 다음 단계의 연구과제로 남긴다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] 류홍우, 김찬기, "과도 안정도를 고려한 정지형 여자기의 새로운 설계기술", 1996년 전력전자학회지 논문지, 제1권, 제1호, p47-55, 1996.11
- [2] 임익현, "동기발전기 디지털 여자시스템 개발에 관한 연구", 홍익대학교, 2001
- [3] ANSI/IEEE Std 421.1-1986, "IEEE Standard Definition for Excitation Systems for Synchronous Machines"
- [4] IEEE Std C37.102-1995, "IEEE Guide for AC Generator Protection"
- [5] 노의철 외, "전력전자공학", p148-156, 2000