

발전기 제어시스템의 점호제어에 관한 연구

이주현*, 임익헌, 류호선, 정태원**

한전 전력연구원*, 한전 전력연구원, 한전 전력연구원, 충남대학교**

A Study on firing control of generator control system

Joo-Hyun Lee-Ick-Hun Lim-Ho-Sun Ryu ·Tae-Won Jeong

KEPRI*,

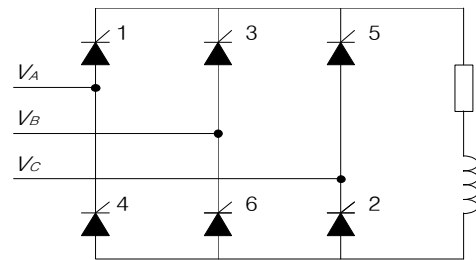
KEPRI,

KEPRI

CNU

ABSTRACT

발전기 제어시스템은 동기발전기의 무효전력 또는 단자전압의 변화에 제어기의 출력신호에 따른 점호제어를 통하여 발전기 계자에 흐르는 전류를 자동조정 함으로써 발전기 단자전압을 목표 값으로 신속하고 안정하게 유지하게 된다. 본 논문에서는 발전기 제어시스템의 위상제어 정류기에서 점호제어 방식에 대하여 살펴보고 점호제어 회로의 특성분석과 실제 발전기 제어시스템에 적용된 결과를 기술하고자 한다.



[그림 1] 3상 전파 정류 브릿지

1. 서 론

발전기 제어시스템은 동기발전기의 계자권선에 직류 전류를 공급하여 계자전압을 조정하고 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 만족스러운 성능 구현에 필수적인 보호기능과 제어기능을 수행하는 것이다. 위상제어 정류기는 여자기 또는 발전기 출력 단에 연결된 여자 변압기로부터 여자전원을 확보하고 이 교류 전압을 싸이리스터 위상제어 정류기에서 점호제어를 통해 직류 전압으로 변환해서 발전기 계자에 공급하는 역할을 한다. 동기발전기가 연속 운전 할 수 있는 범위 내에서 동기발전기의 유효 출력 변화 또는 무효 출력, 단자전압 변화에 대하여 계자전류를 자동조정 함으로써 발전기 단자전압을 목표 값으로 신속하고 안정하게 유지할 수 있어야 하기 때문에 발전기 제어시스템에서의 점호제어는 매우 중요한 역할을 담당하고 있다.

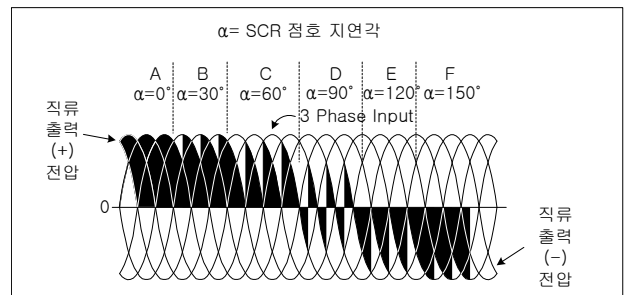
본 논문에서는 발전기 제어시스템의 위상제어 정류기에서 점호제어 방식에 대하여 살펴보고 점호제어 회로의 특성분석과 실제 발전기 제어시스템에 적용된 결과를 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 위상제어 정류기

발전기 제어시스템에서 위상제어 정류기는 제어기로부터 제어신호를 입력받아 직접 전력변환 스위칭 소자를 점호시키는 부분이다. 현재 국내 발전소에서 주로 사용하는 전력변환용 스위칭 소자로는 싸이리스터를 가장 많이 사용하는데, 발전기 출력전압을 위상제어 정류하기 위해 검출된 위상을 기준으로 제어신호의 크기에 따라 위상각을 조절하여 정류 출력을 제어하는 것이 기본 원리이다. 아래 [그림 1]은 3상 전파 정류용 브릿지를 보여주고 있다.

3상 전파 정류 브릿지에서 싸이리스터가 Commutation(轉流) 실패 없이 안정적인 운전이 되도록 실제 사용하는 점호지연각(정류 각)의 최소/최대 값은 일반적으로 100Adc 미만의 소 전류와 고주파수(420Hz) 정류기는 $\alpha_{min}=30^\circ, \alpha_{max}=150^\circ$ 이고, 수천 암페어의 대 전류와 상용 주파수(60Hz) 정류기는 $\alpha_{min}=15^\circ, \alpha_{max}=165^\circ$ 로 설계한다. 아래의 [그림 2]는 싸이리스터 점호각 α 를 변경시켰을 때 정류기 출력단의 전압파형을 나타낸 것이다.



[그림 2] 싸이리스터 출력 파형

2.2 점호제어 방식

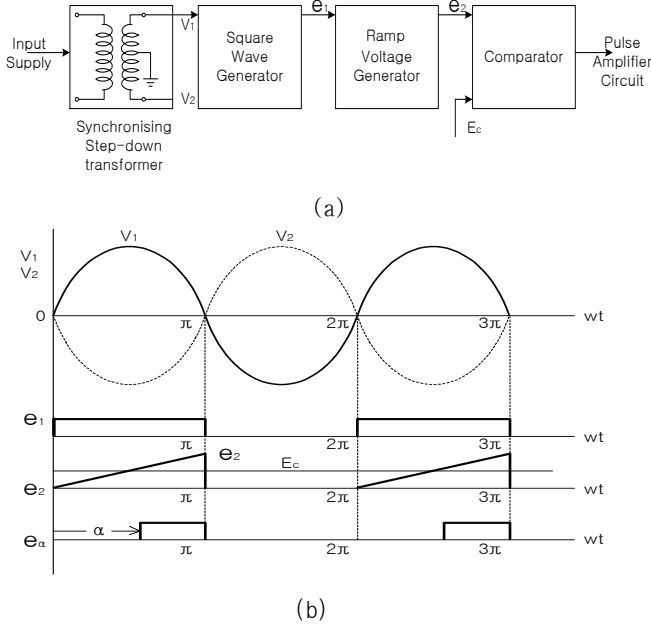
원하는 직류전압 크기를 제어하기 위해서는 적정 시점에 싸이리스터(SCR)를 점호하여야 한다. 점호시점은 제어기에서 출력되는 제어신호(Control Signal)에 의해서 결정되는데, 위상제어 컨버터에서 싸이리스터는 교류 입력 기준점에 대한 점호각(Firing Angle) α 에 의해서 점호시점이 결정된다. 위상 점호제어하는 방법에 따라 선형 점호각 제어방식(Linear Firing Angle), 코사인 점호각 제어(Cosine Wave Crossing) 방식과 PLL(Phase Locked Loop Method) 방식이 있다.

2.2.1 선형 점호제어 방식

이 방식은 위상 검출신호에 동기 되는 톱니 파형과 제어신호가 일치하는 시점에서 점호신호를 발생하여 스위칭 소자를 점호하는 방식이다. 아래의 [그림 2]는 위상각 α 선형 제어기의 동작원리를 도시한 것으로, 제어전압 E_c 에 선형적으로 위상각 α 가 변경되며, 점호각 및 제어기 출력전압 식은 다음과 같다.

$$\alpha = k_1 E_c \quad (1)$$

$$E_o = E_{max} \cos \alpha = E_{max} \cos(k_1 E_c) \quad (2)$$



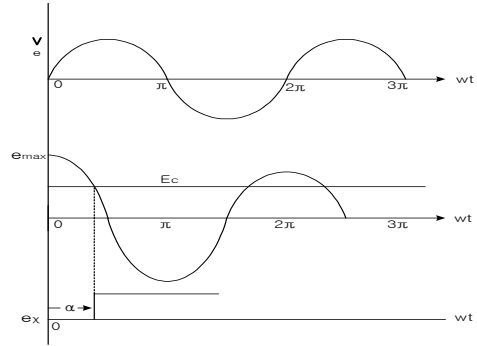
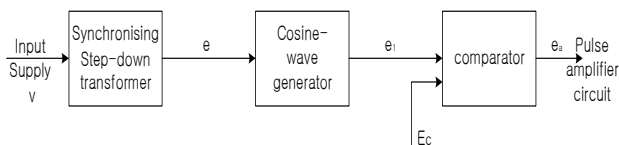
[그림 2] 위상각 α 의 선형제어

2.2.2 코사인 점호 제어방식

선형 점호각 제어방식의 단점을 개선한 방식으로써 톱니파형 대신에 코사인 파형을 적용하여 제어 입력신호 제어에 대하여 정류된 직류 출력 값이 선형적 방식이다. 이 방식은 입력 전압을 코사인 전압으로 변환해서 이 변환된 전압과 제어 전압이 교차 지점에서 점호펄스를 발생시킨다. [그림 3]은 기본 개념을 설명하고 있으며, 위상각 α 및 정류기의 출력전압은 식 (3), (4)와 같다.

$$\alpha = \cos^{-1} \left[\frac{E_c}{e_{max}} \right] \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_o &= E_{max} \cos \alpha \\ &= E_{max} \cos \left[\cos^{-1} \frac{E_c}{e_{max}} \right] \\ &= \frac{E_{max}}{e_{max}} E_c = k_2 E_c \end{aligned} \quad (4)$$



[그림 3] 위상각 α 의 Cosine Control

2.2.3 PLL(Phase Locked Loop)방식

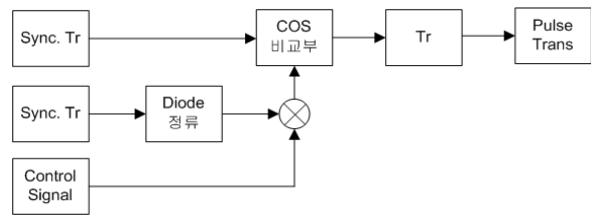
코사인 점호각 제어방식에 사용되는 코사인 파형은 전원 측으로부터 직접 구하게 되는 방식이므로, 전원 측에 고조파가 존재할 경우 오점호신호가 될 수 있으며, 또한 이의 해결을 위해 필터를 설치할 경우 위상 지연에 따른 점호지연은 피할 수 없게 된다. PLL은 이런 문제를 해결한 제어방식으로서 위상을 전원 측과 동기시켜, 이 동기 된 위상을 기준으로 60Hz의 코사인 파형을 생성하여 제어하는 방식이다.

2.3 점호제어 회로의 특성분석

국내 발전소의 발전기 제어시스템에 적용된 점호제어 회로는 제작사마다 시스템의 특성에 맞게 다양하게 적용되었다. 우선 몇 개 발전소에 적용된 발전기 제어시스템의 점호제어 회로를 분석하고 특징들을 기술하였다.

2.3.1 무주양수 점호제어 회로

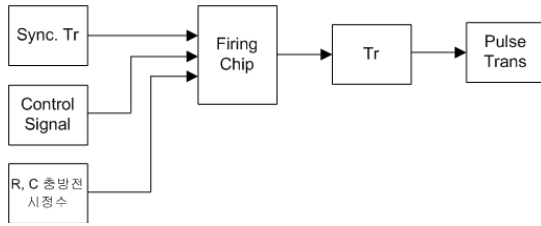
무주양수 발전소 발전기 제어시스템의 점호제어 회로는 앞에서 기술한 점호제어 방식 중에 코사인 점호제어방식이다. 입력 동기신호와 제어신호를 곱하여 제어신호를 생성하여 생성된 제어신호와 동기신호를 다시 비교하는 방식이다. 이 회로의 특징은 입력 동기신호와 제어신호를 곱하여 제어신호를 생성하고, 저전압시에도 제어가 잘 된다는 장점이 있다. 아래 [그림 4]는 점호제어 회로의 블록다이어그램을 나타낸다.



[그림 4] 무주양수 점호제어회로 Block Diagram

2.3.3 청평양수 점호제어 회로

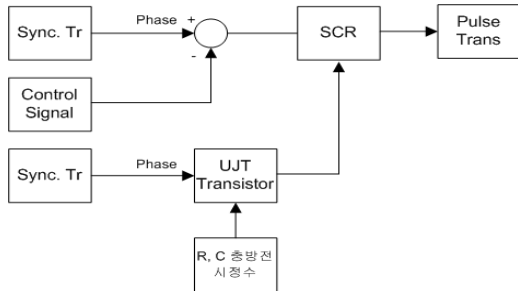
청평양수 발전소 발전기 제어시스템의 점호제어 회로는 앞에서 기술한 점호제어 방식 중에 선형 점호제어방식이다. 점호제어를 위한 TCA785 전용 칩을 사용하였으며 칩에 입력되는 RC 시정수를 이용하여 톱니파를 발생시키고 이를 제어신호와 비교하여 비교되는 지점에서 점호펄스(Firing Pulse)를 발생하는 방식이다. 이 회로의 특징으로는 50/60Hz의 전용 칩을 사용하기 때문에 저주파수 시에 발생하는 톱니파가 포화되어 제어영역이 주파수와 반비례하여 작아지게 되는 단점이 있다. 다음의 [그림 6]는 점호제어 회로의 블록다이어그램을 나타낸다.



[그림 6] 청평양수 점호제어회로 Block Diagram

2.3.2 고리원자력 점호제어 회로

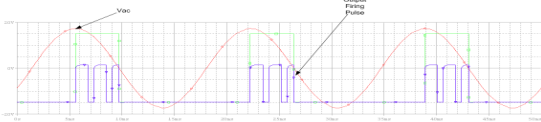
고리원자력 디젤발전기 제어시스템의 점호제어 회로는 동기 신호와 제어신호를 입력받아서 UJT 트랜지스터와 싸이리스터 (SCR)를 도통시켜 점호신호를 발생하는 방식이다. 이 회로의 특징으로는 소자가 간단하여 단순하다는 장점이 있으나 저항 및 커패시터의 충전 방전 시정수에 의해 3상 펄스를 생성하므로 이를 조정해야 한다는 것과 저 전압에서는 동기변압기의 전압이 작아져 싸이리스터 출력펄스가 감소하고 입력전압이 저 전압 시에는 출력이 일부 불안정하게 되는 점이 있다. 아래 [그림 5]는 점호제어 회로의 블록다이어그램을 나타낸다.



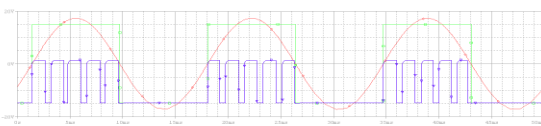
[그림 5] 고리원자력 점호제어회로 Block Diagram

2.4 전동발전기 모의시험 결과

앞에서 살펴 본 여러가지 점호제어 방식 중에 고리원자력발전소 비상디젤발전기의 특성을 감안하여 저전압시에도 비교적 전압제어가 잘 되는 무주양수 타입의 점호제어회로를 구현하여 별도의 전동발전기를 이용하여 시험하였다. 동기변압기 2차 측에서 동기신호를 입력받고 주 제어기로부터 제어신호를 입력받아 이를 비교하여 출력 점호펄스를 생성하는 방식으로 제어신호의 변화에 따라 출력이 정상적인지 시험하고 확인하였다. 아래 [그림 7]과 [그림 8]은 제어신호의 증감에 따라 점호각의 변화를 나타내며, [표 1]은 출력전압의 변화하는 값을 보여준다.



[그림 7] 제어신호 0 Vdc인 경우 출력 파형

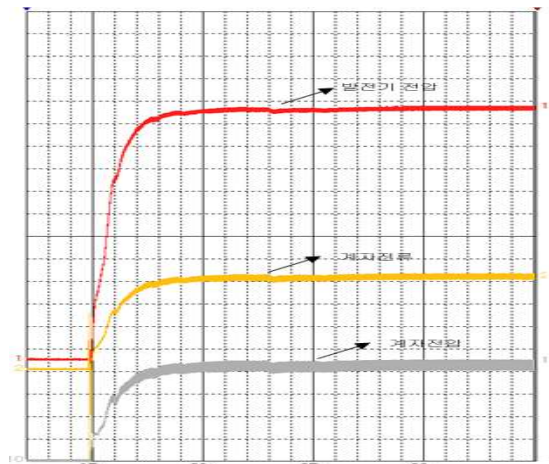


[그림 8] 제어신호 10 Vdc인 경우 출력 파형

[표 1] 제어신호에 따른 출력특성 변화

주파수	입력전압	제어신호	출력전압	비 고
60Hz	180Vac	0V	12VDC	
60Hz	180Vac	2V	40VDC	
60Hz	180Vac	4V	80VDC	
60Hz	180Vac	6V	123VDC	
60Hz	180Vac	8V	164VDC	
60Hz	180Vac	10V	210VDC	

위의 파형과 표에서 볼 수 있듯이 제어출력 신호가 증가함에 따라서 점호제어를 통해 출력전압이 변화하여 정상적으로 동작함을 확인할 수 있었다. 아래의 [그림 9]는 점호제어 회로를 발전기 제어시스템에 적용하여 전동발전기를 이용한 모의시험 시 자동운전 모드에서 전압확립 시험의 결과를 나타낸다.



[그림 9] 자동운전 모드 시 전압확립 결과

3. 결 론

본 논문에서는 발전기 제어시스템의 위상제어 정류기에서 점호제어 방식에 대하여 살펴보고 발전소마다 다양하게 적용된 점호제어 회로의 특성분석과 실제 발전기 제어시스템에 적용하여 모의 시험한 결과를 기술하였다. 선진 외국 제작사 기술에 전적으로 의존하던 원전 비상디젤발전기 제어시스템을 순수 국내기술로 개발하는 많은 도움이 될 것이다.

참 고 문 헌

- [1] P. Kundur, "Power System Stability and Control," McGraw-Hill Inc., 1994.
- [2] IEEE 421.4-1990 Guide Specification for Excitation Systems
- [3] 임익현, 이주현 류호선 외 "발전기용 다중화 정지형 디지털 여자시스템 개발" 최종보고서, 전력연구원
- [4] 임익현, 김수열, 류호선 외 "800MW 발전기용 여자시스템 정류기 단일채널 설계보고서", TM.99GC06. P2000.545, 전력연구원, 2000
- [5] 임익현, "동기발전기 디지털 여자시스템 개발에 관한 연구", 전력연구원, 2001