

회력발전소 여자시스템 위상제어 정류기 설계에 관한 연구

이주현, 류호선, 임익현, 송성일
전력연구원, 전력연구원, 전력연구원

A Study of phase controlled rectifier design of excitation system for thermal power plant

J.H.Lee, H.S.Ryu, I.H.Lim, S.I.Song
KEPRI, KEPRI, KEPRI, KEPRI

Abstract - This is the study on static excitation system of synchronous generator of large capacity in new model, which was developed by KEPRI using triple redundant digital method, associate three bridges of thyristor phase controlled rectifier. This paper will discuss the design conception and the application results of system which includes the power control devices(thyristors, GTO) and power excitation potential transformer.

The multi-paralleling thyristor bridge converters of N+1 method have firing circuit. The initial product manufactured by proposed design in the study is in commercial operation, completing installation and commissioning in 400MW Thermal Power Plant. The performance test is done in practical technique.

정류기는 제어기로부터 제어신호를 입력받아 직접 스위칭 소자를 점호시키는 부분이다. 스위칭 소자(싸이리스터)를 사용하여 발전기 출력전압을 위상제어 정류하기 위해 검출된 위상을 기준으로 제어신호의 크기에 따라 정류각(점호각)을 조절하여 정류기 출력을 제어하는 것이 기본 원리이다. 본 연구에 적용된 위상제어 정류기의 구성품은 Heat Sinks, 전력용 싸이리스터 반도체 소자, 반도체 보호용 폐속단선 특성휴즈, Snubber, Pulse Transformer, 싸이리스터 점호 펄스 발생용 동기 변압기, 전원공급장치, 전력용 교류 계자 차단기, 식류 개폐기, 냉각용 송풍기, 전류 및 전압측정용 CT, PT, 그리고 발전기 계자 코일에서 유기 되는 높은 전압을 억제, 제한시키는 과전압 억제기(Surge Suppressor), 누설자속 및 자속 불평형으로부터 유기 되는 발전기 축전압 억제용 Shaft Voltage Suppressor, 정류기 점호 과정에서 발생하는 고조파를 개선하는데 필요한 직류 및 교류 필터 등이 설치되어 있다.

1. 서 론

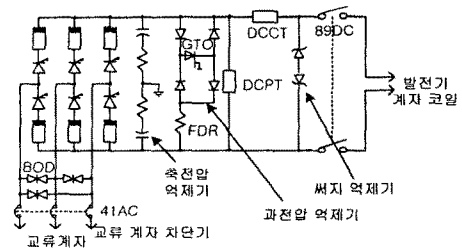
발전기 여자시스템의 기본 기능은 동기기의 계자권선에 직류 전류를 공급하는 기능으로서 계자전압을 조정하여 계자전류를 제어함으로써 전력계통의 만족스러운 성능 구현에 필수적인 보호기능과 제어기능을 수행하는 것이다. 전력연구원에서 개발한 디지털 여자시스템은 발전기 전압제어 및 발전기 여자기 시스템 보호, 제한 기능을 수행하는 3중화 디지털 제어기와 제어기로부터 제어신호를 받아서 필요한 계자 전류를 공급하는 N+1방식의 다병렬 싸이리스터 위상제어 정류기, 여자변압기 그리고 여자시스템을 구성하는 각종 주변장치들로 구성되어 있다. 또한 기존 고가의 대용량 직류 계자 차단기를 대신해서 저가의 교류차단기를 사용하는 방법, GTO(Gate Turn on/off) 반도체 소자를 사용한 폐속 감자회로(Solid State Fast De-excitation system)와 고속 연산용 다중화 디지털 분산제어 시스템을 자동 전압조정 연산기로 사용하여 여자시스템을 구성하였다.

이중 위상제어 정류기는 여자기 또는 발전기 출력단에 연결된 여자 변압기로부터 여자전원을 확보하고 이 교류 전압을 싸이리스터 위상제어 정류기에서 직류 전압으로 변환해서 발전기 계자에 공급하는 역할을 한다. 동기 발전기 능력 관점에서 볼 때 여자시스템은 동기발전기가 연속 운전 할 수 있는 범위 내에서 동기기 유효 출력 변화 또는 무효 출력, 단자전압 변화에 응하여 계자 전류를 자동조정 함으로써 발전기 단자전압을 목표 값으로 신속하고 안정하게 유지할 수 있어야 한다.

본 논문에서는 여자시스템의 위상제어 정류기와 위상제어 방식을 기술하고, 위상제어 정류기의 설계 기준 및 설계내용 그리고 Y회력발전소에 실제 적용된 시스템의 현장 적용 결과를 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 위상제어 정류기



[그림 1] 위상제어 정류기 및 계자 회로

2.2 위상제어 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 제어하는 방법에 따라 선형 점호각 제어방식(Linear Firing Angle), 코사인 점호각 제어(Cosine Wave Crossing) 방식과 PLL(Phase Locked Loop Method) 방식이 있다.

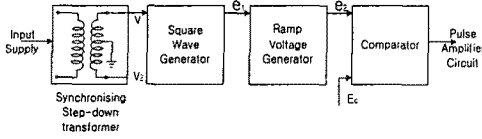
2.2.1 선형 점호각 제어방식

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

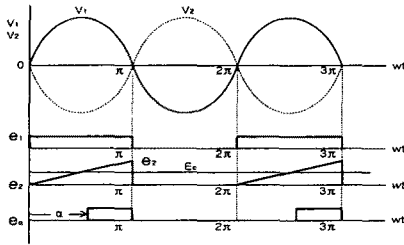
$$\alpha = k_1 E_c$$

(1)

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



(a)



(b)

[그림 2] 위상각 α 의 선형제어

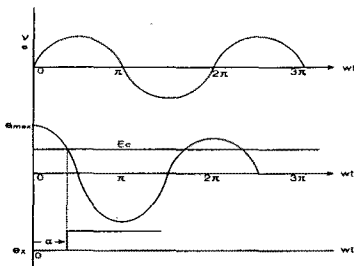
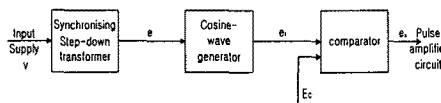
2.2.2 코사인 점호각 제어방식

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

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

$$E_o = E_{max} \cos \alpha = E_{max} \cos \left[\cos^{-1} \frac{E_c}{e_{max}} \right]$$

$$= \frac{E_{max}}{e_{max}} E_c = k_2 E_c \quad (4)$$



[그림 3] 위상각 α 의 Cosine Control

2.2.3 PLL(Phase Locked Loop)방식

코사인 점호각 제어방식에 사용되는 코사인 파형은 전원측으로부터 직접 구하게 되는 방식이므로, 전원 측에 고조파가 존재할 경우 오점호가 될 수 있으며, 또한 이의 해결을 위해 필터를 설치할 경우 위상지연에 따른 점호지연은 피할 수 없게 된다. PLL은 이런 문제를 해결한

제어방식으로써 위상을 전원측과 동기시켜, 이 동기된 위상을 기준으로 60Hz의 코사인 파형을 생성하여 제어하는 방식이다.

2.3 위상제어 정류기 설계개념 및 내용

2.3.1 대상발전소 발전기 및 여자기 사양

- 발전기 정격전압 : 19000V, - 정격전류 : 14378A
- 정격 계자전압 : 482V, - 정격 계자전류 : 4454A
- 무부하 정격 계자전류 : 1500A
- 무부하 정격 계자전압 : 154V

2.3.2 정류기 설계 개념 및 내용

가. 3상 싸이리스터 위상제어 정류기

여자기 용량이 10~20MVA 이상이거나 여자 전류 크기가 200~300[A]이상이면 3상 전파 정류 브릿지를 사용하는것이 일반적인 추세이며, 정류기 정격출력을 얻는데 필요한 전류 및 전압여유도는 1.1을 적용하였다.

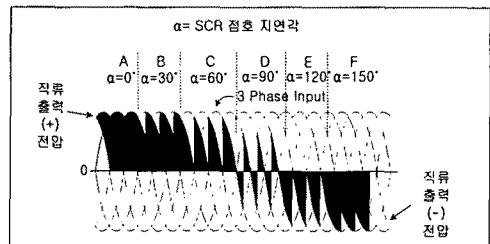
- 직류전류 : $I_{EXN} = K_1 \times I_{IN}$ (전류 여유도 : $K_1 \geq 1$)
- 직류전압 : $V_{EXN} = K_2 \times V_{IN} = K_2 \times I_{IN} \times R_{IN}$
(전압 여유도 : $K_2 \geq 1$)
- 정류기 설계 정격 : $I_{EXN} \times V_{EXN}$

$$I_{EXN} \geq 1.1 \times 4454 = 4900A$$

$$V_{EXN} \geq 1.1 \times 482 = 530V$$

$$\ast \text{정류기 정격출력} : 4900 \times 530 = 2,597KW$$

3상 전파 정류브릿지에서 싸이리스터가 Commutation (轉流) 실패없이 안정적인 운전이 되도록 실제 사용하는 점호 지연각(정류각)의 최소/최대 값은 100Adc 미만의 소전류와 고주파수(420Hz) 정류기는 $\alpha_{min} = 30^\circ$, $\alpha_{max} = 150^\circ$ 이고, 수천 암페어의 대전류와 상용 주파수(60Hz) 정류기는 $\alpha_{min} = 15^\circ$, $\alpha_{max} = 165^\circ$ 로 설계하며, 아래의 [그림 4]는 싸이리스터 점호각 α 를 변경시켰을때 정류기 출력단의 전압파형을 나타낸 것이다.



[그림 4] 싸이리스터 출력 파형

나. 여자 변압기

여자 변압기의 설계 용량은 발전기 정격용량의 0.5~0.6% 용량이며, 정류기 쪽의 충분한 전류(轉流) 효과를 고려하여 %임피던스는 6~8% 내외로 설계하고, 여자 변압기 2차전압은 여자시스템의 Ceiling Voltage를 고려하여 아래와 같이 결정한다.

$$V_2 = \frac{\pi(V_P \times V_{fb} + V_{fd})}{3\sqrt{2}(\cos \alpha_{min} - 0.5 \times I_Z)}$$

여기서 V_2 : 여자변압기 2차 선간 전압

V_P : Ceiling Voltage 지정 상수

V_{fb} : 무부하 계자전압

V_{fd} : 각 회로 및 정류기의 전압강하

α : 최대진상 점호각(10~20°)

I_Z : 여자변압기 임피던스

$$\text{변압기 용량} = \sqrt{3} \times V_2 \times \sqrt{\frac{2}{3}} \times I_{EN}$$

$$V_2 = \frac{3.14(5.0 \times 154 + 10)}{3\sqrt{2}(\cos 15 - 0.5 \times 0.07)} = 620 [V_{ac}]$$

$$\begin{aligned} \text{※ 변압기 용량} &= \sqrt{3} \times 620 \times \sqrt{2/3} \times 4900 \\ &= 4296000 [VA] \approx 4300 [KVA] \end{aligned}$$

여자변압기는 정류용 변압기이기 때문에 일반 전력용 변압기와는 다르게 위의 용량에 고조파 함유율이 고려된 충분한 용량으로 설계되어야 한다.

다. 싸이리스터 용량 설계

여자시스템의 용량이 결정되면 스윗칭 소자에 대한 정격을 결정되어야 하는데, 정류기 입력 교류전압은 620[V]이고 정류기 출력 직류 전류는 4900[A]이다. 싸이리스터 소자의 전압정격은 교류 입력 전압의 최대치의 3배 이상으로 하는 것이 일반적이다.

$$\begin{aligned} \therefore \text{싸이리스터 전압정격} &= \text{정류기 입력전압(선간)} \times \sqrt{2} \times 3.0 \\ &= 620 \times 1.414 \times 3 \approx 2630 [V] \text{ 이상} \end{aligned}$$

또한 싸이리스터 전류용량 및 열저항은 정류기 출력정격전류가 4900[A]이므로 한 개의 브릿지에 흐르는 전류는 $4900/2 = 2450 [A]$ 이고, 싸이리스터 전류 정격은 발생열에 따라 결정되고 발생열은 주기당 평균전류와 관련되어 브릿지내에서 각각의 싸이리스터에 흐르는 평균전류는 $2450/3 = 817 [A] (\approx 820)$ 가 되므로 이에 따른 발생열과 방열판의 열용량에 따라서 결정된다.

라. 초기여자 변압기

발전기 전압확립 위해 최소한의 여자전압 확보를 위한 것으로, 일반적으로 초기여자 전압보다 PCR 출력전압이 크게 설계하며, 통상 무부하 정격전압의 10~30%에 해당하는 여자전류를 10초동안 공급하도록 설계한다. 발전기 정격전압의 19000[V]의 30%인 5700[V]를 확립할 수 있는 계자전류를 공급할 수 있도록 초기 여자변압기 및 관련 정류기 그리고 교류 직류측 전자 접촉기를 설계한다. 이때의 계자전류는 무부하 계자전류의 1500[A]의 30%인 450[A]가 되며, 계자전류 450[A]를 공급하기 위한 계자전압은 무부하계자전류의 30% 값에다 계자권선의 저항값을 곱해서 정한다.

$$450 [A] \times 0.085 [\Omega] = 38.25 [V] \quad (3.32)$$

이 직류 계자전압을 공급하기 위해서 필요한 변압기의 2차 전압 결정은 다이오드 3상 브릿지에서 전파 정류하여 다음과 같다.

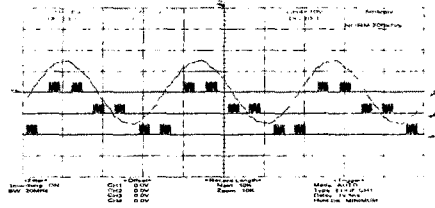
$$\begin{aligned} \text{변압기 2차전압} &= \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \times \frac{(38.25 + 10)}{(1 - 1/2 \times 0.07)} = 37.0 [V_{ac}] \quad (3.33) \end{aligned}$$

변압기 용량 = $\sqrt{3} \times 37 \times 450 \times \sqrt{2/3} = 23.5 [KVA]$ 으로, 변압기 제작규격은 여유를 조금 두어 25[KVA]로 제작하며 1차측에 Tap을 5[V]단계로 3개를 두었다.

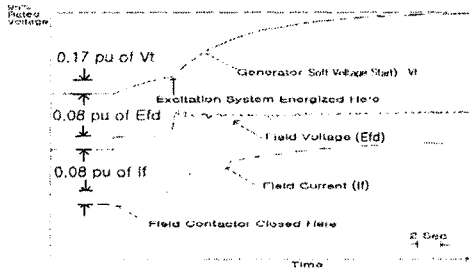
라. 계자 방전 저항 FDR(Field Discharge Resistor) 계자 축적에너지 방전회로로 계자회로의 과전압 억제하며, 문헌 참조하면 계자저항의 1~15배의 방전저항 설계하나 일반적으로 계자저항의 4~5배 정도로 설계함.

2.4 현장 설계용 적용 결과

연구개발을 통해 설계된 시스템은 Y화력발전소(400 Mw급)에 실증 적용하여 성능을 검증하였다. 아래의 [그림 5]는 적용된 위상제어 정류기의 Gate Pulse 파형을 나타내며, [그림 6]은 초기 전압 확립 과정을 나타낸 것으로, 전압 확립시 일차 놀림목이 있는 곳은 초기 여자 전류(Initial Flashing) 공급과 주 정류기 사이에서 과도적으로 나타난 현상이며, [그림 5]와 [그림 6]에서 보는 바와 같이 양호하게 발전기 전압이 확립됨을 확인할 수 있었다.



[그림 5] GATE PULSE 파형



[그림 6] 발전기 전압 확립 특성

3. 결 론

본 논문은 선진 외국 제작사 기술에 전적으로 의존하던 대용량 화력발전기 자동전압 제어장치인 여자제어 시스템을 순수 국내 기술로 개발하여 성공적으로 발전소 현장에 적용한 결과를 기술한 것이다. 지면상의 한계 때문에 시스템의 모든 설계내용을 기술하지 못한점 아쉬움이 있지만, 위상제어 방식, 정류기 설계기준과 실 계통 적용을 위한 위상제어 정류기의 설계내용들을 기술하였다. 본 시스템은 모의 실증시험을 필한 후 현장에 적용하고 그 성능을 검증하였으며, 각종 성능시험은 IEEE 421.4 기준에 따라 실시하여 만족스런 결과를 취득하였다.

[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