

대용량 발전기 정지형 여자시스템 계자회로에 발생하는 최적 과전압 억제 회로

임익헌, 류호선, 김수열
전력연구원 시스템통신연구소

Optimal Protecting the Static Excitation Equipment and Rotor Windings of Synchronous Machines Against Overvoltage

I.H. LIM, H.S. RYU, S.Y. KIM
Korea Electric Power Research Institute

Abstract - In the case of synchronous machines, certain power system disturbances cause the induced rotor current to assume negative values when no static converter is present. A converter, however, prevents negative current from flowing, so that overvoltages occur. The overvoltages can be effectively limited as crowbar circuit using GTO. This newly proposed crowbar circuit with current limiting resistor absorbs energy when overvoltage comes from power system repeatedly and is verified through experiment.

파적으로 억제하기 위해서는 각각의 대처방안이 수반되어야 한다. 동기기 여자시스템에 발생하는 과전압 현상을 일반적으로 분류할 때 다음의 4개 그룹으로 분류할 수 있다.

- 제어 정류기 입력단, 즉 여자변압기 고압과 저압측의 교류측에서 발생하는 과전압으로써 전력계통의 차단기등의 스위칭 과도 상태에서 발생하는 것과 낙뢰, 선로 고장등으로 인해서 발생하는 것이 그것이다.

- 여자변압기를 정지할 때 야기되는 과전압 현상이 있는데, 그 원인은 여자 변압기의 큰 인덕턴스와 주변압기 인덕턴스 사이를 흐르는 부하전류가 계속해서 흐르려고 하는 성질때문에 발생하는 것과, 무부하 여자 변압기를 정지할 때 자기적(Magnetic energy)에너지가 전기적 에너지로 변환되는 과정에서 과전압이 발생한다.

1. 서 론

발전소 단위기기의 대용량화가 설비 전체효율, 경상인원절감, 건설입지단 해소등 여러 가지 문제점을 해결할 수있으므로해서 설비용량이 500-800MW급의 초대형으로 커지는 추세이다. 전력전자 기술의 발전으로 대전력제어 반도체 소자가 속속 개발됨으로 해서 교류회전 여자시스템의 회전자 진동, 늦은 응답특성, 회전기기의 빈번한 보수, 낮은 효율등의 문제점이 개선된 싸이리스터 직접여자형인 정지형 여자시스템으로 교체되어가는 실정이다. 회전형이 30A-100A의 여자전류인 반면에 같은 발전 용량의 정지형은 3000A-5000A 직류전류를 제어한다. 동기발전기 회전자 권선 및 여자시스템은 전력계통의 동요나 시스템 자체 운전시에 발생하는 여러가지 요인들에 의해서 계자회로 주변에, 과전압 현상이 필연적으로 발생된다. 과도전압으로 인한 정류기 반도체와 회전자 손상을 방지할 목적으로 Crowbar라 불리는 과전압 억제회로를 사용한다. 소전류인 회전형에서는 비선형 저항기인 Varistor, Thyritor등의 상품명을 갖는 MOV(Metal Oxide Varistor)등을 사용하고 있으며, 대전류 정지형은 전력소자의 한계로 대용량 SCR을 역병렬로 연결하고 과전압시 SCR Gate를 점호하여 전류를 소멸시킨다. 발생하는 과도 전압현상은 그 크기는 매우 크지만 에너지가 작은 순간과도전압일 경우가 대부분인데 이 때마다 발전을 비상정지 시킬경우에는 발전소 이용을 저하 또는 안정적 전력공급 측면에서 매우 부정적인 요소이다. 이를 해소하기 위해서는 GTO를 사용하여 Gate On/Off 제어를 수행함으로써 최대허용 전압 이하의 설정전압에서 Gate를 On하여 방전용 Dummy 저항에 전류를 도통시켜 과전압을 억제시키고 전압이 일정전압이하 하강시는 Gate를 다시 Off하여 계속적인 과전압제어를 수행한다. 저항에 흐르는 전류량 시간함수를 도입하여 과대 에너지성의 과도전압이 내습한 경우 이외에는 발전기 비상정지까지 가지 않도록 하는 방식이다.

- 제어정류기의 주 전력소자인 싸이리스터의 정공축적 효과(Hole Storage Effect)에 기인해서 발생되는데, 싸이리스터 및 다이오드의 교류 특성상 전류가 흐르다가 영으로 될 때 순간적으로 역전류가 흐르는데 이 때 역방향 전류가 차단되면서 정류회로에 과전압이 유기된다.

- 제어 정류기는 정방향 전류만 흐를 수 있는데 만약에 외부 영향으로 부방향으로 전류를 흐르게하려고 하는 외부요인이 발생하면 이로 인해서 과전압이 발생된다. 그런데 외부 영향이란 동기기가 상이 불일치(out-of-phase)되거나, 비동기 운전되거나, 또는 선간 단락이나 3상단락등의 현상이다.

2. 본 론

2.1.1 회전자권선과 제어정류기의 과전압

정상상태에서 계자회로의 직류전압은 여자 시스템에 의해 결정된다. 과도상태에서는 계자전류가 일정기간 동안 역방향으로 흐르게 된다. 하지만 SCR을 사용한 제어정류기에서는 역전류가 흐르지 못하므로 계자회로는 이 기간 동안 개방된다. 따라서 계자회로에 유기되는 전압은 계자 권선 단자에 나타나게 된다. 이러한 현상은 여러종류의 외란의 결과로써 나타날 수 있는데 외란의 종류는 다음과 같다.

- 2 선간, 3상 단락회로(부족여자 운전 영역)
- 위상 불일치
- 비동기 운전

이들중 2선간 비대칭 단락회로가 가장 과전압이 크다[8]. 이유는 먼저 계자전류의 DC 성분 변화폭이 3선 단락의 절반정도이기 때문이고, 다른 한편 기본 교류성분외에 기본주파수의 2배되는 교류성분이 추가 발생한다. 따라서 계자전류의 교류성분은 3선 단락시보다 크게 된다.

2.1 동기기 여자회로의 과전압

동기기 계자회로의 여러형태 과전압을 발생원별로 효

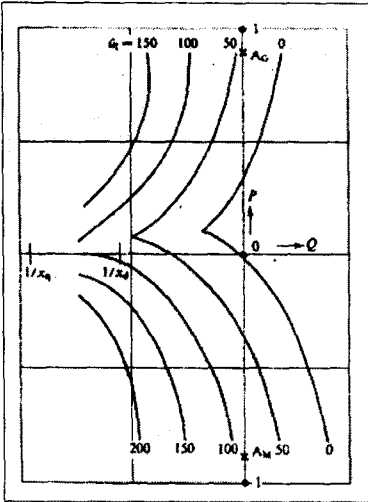


그림1 돌극형 동기기의 과전압 제적

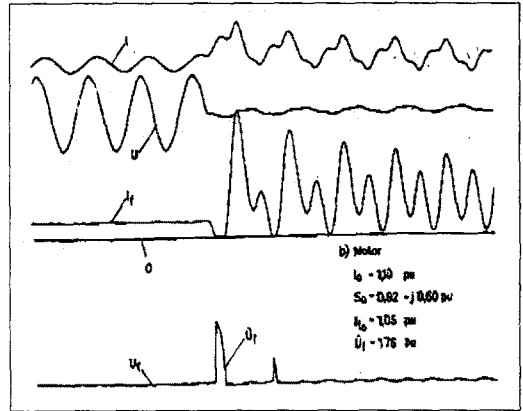
P = 단위법으로 표시된 유효전력
 Q = 단위법으로 표시된 무효전력

그러므로 비대칭 2선간 단락회로의 경우 계자전류는 역방향이 되어 계자회로에 과전압이 발생할 수 있다. 그 동작점은 회전자 과전압 제적으로써 잘 설명이 된다. 그림 1은 일체형 동기기의 과전압 제적을 보여 준다. 정격부하 역률 1에서 전동기로 운전중 선간 단락되면 공극 여자 전압의 90배에 해당하는 회전자 과전압이 기기에 발생한다. 그림1의 제적을 계산할 때 모든 저항요소와 회전자 회전 운동의 영향이 고려되어야 한다. 또한 관심있게 주목해야 할 것은 전동기로 동작시 발생 과전압이 발전기 동작 과전압보다 크다는 것이다. 회전자 과전압 관련하여 전동기가 발전기보다 훨씬 더 스트레스를 받는다는 것이다. 이 차이가 발생하는 이유는 단락시 계자전류의 동작 때문이다. 그림 2를 보면 회로 단락시 전동기 운전이 발전기 운전보다 먼저 계자 전류가 감소하여 영으로 된다. 그림 2로써 계산에 기초한 예측 결과를 확인해 볼 수 있다. 삼상기에서 위상 불일치는 동기장치의 계획예방정비 후 빈번히 발생하게 된다. 변압기 상의 오결선으로 상차가 $\pm 60^\circ$, $\pm 120^\circ$, $\pm 180^\circ$ 이 발생하나 동기스코프는 정확히 일치한다고 지시한다. 계자 전류 동작으로부터 추론할 수 있는 것은 위상차 $\pm 60^\circ$ 로 동기시 계자 전류는 첫 번째 사이클 내에서 음의 크기를 갖게되며 다음과 같은 관계식이 성립한다. (3)

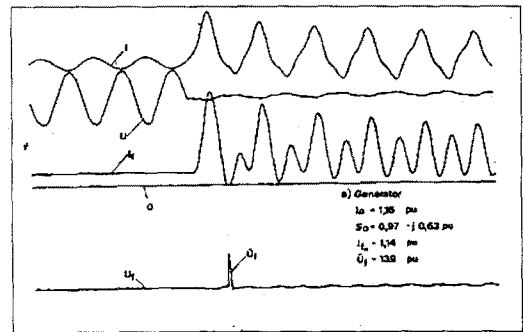
$$\frac{x_d - x_d}{x_d - x_N} \frac{x_d - x_c}{x_d - x_c} > 2 \quad \text{3상 선간}$$

$$\frac{x_d - x_d}{x_d - x_N} \frac{x_d - x_c}{x_d - x_c} > 1.1 \quad \text{선간 비대칭}$$

$x_a=1.59$, $x_a=0.31$, $x_d=0.213$, $x_c=0.155$, $x_N=0.1$ 인 동기기 경우 $\delta=60^\circ$ 동기 위상차를 갖게 되면 계자 전류는 처음 몇 개의 사이클내에서 음의 값을 갖지 않으나, 차단기 오동작으로 2극의 단자 접촉이 있게 되면 계자 전류는 곧 바로 음의 값을 갖게 된다. 실제 회전자와 과도한 진동에 따라서도 계자 전류는 몇 사이클 후에 음의 값을 가져서 과전압을 발생시킬수도 있다.



(그림 2-a) 발전기



(그림 2-b) 전동기

그림2. 철극형 발전기의 출력단 선간단락
 I = 고정자 상전류 U = 고정자 전압
 I_r = 여자전류 U_r = 여자전압

그림 3은 원통형 회전자인 증기터빈 발전기에서 발생하는 과전압 현상이다.

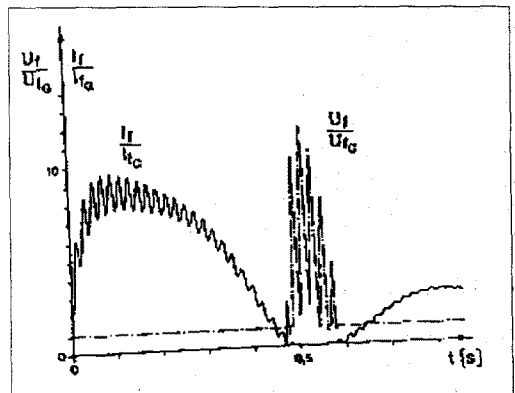


그림3. 180° 위상 불일치시 계자전압 및 계자전류

2.1.1 회전자 과전압 설계

회전자 과전압은 다음 조건에 따라 크게 변한다.
 - 고장종류, - 동작시간
 - 기기종류(발전기, 전동기)
 - 계동권설 설계

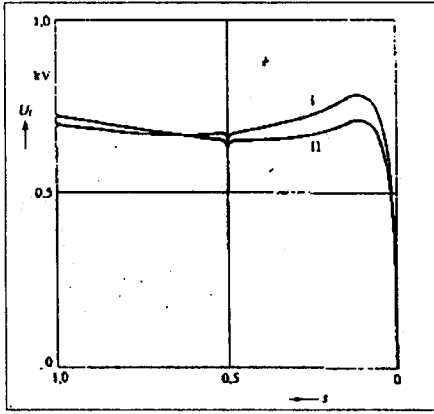


그림4. 계자공극의 상호회전 운동함수에 따라 계자 회로에 발생된 회전전압의 실효치

$S = \text{Slip}$ $U_f = \text{여자전압}$

불행히도 과전압을 발생시키는 외란의 형태나 과전압에 대한 분석을 정확히 할 수는 없다. 수없이 다양한 종류의 외란에 대한 연구를 개별적으로 수행하는 것도 만족스러운 방법이 될 수는 없다. 참고문헌[8]의 설명과 같이 과전압은 회전자의 회전에 의해 계자 권선에 유기되는 회전 전압이다. 이렇게 하여 과전압의 크기가 단순한 과전에 의해 결정될 수 있다. 개방된 계자회로에 유기되는 회전 전압은 d축의 동기회로에서 슬립이 0과 1사이인 범위에서 정해진다. 이러한 방법의 두번째 장점은 철심의 철 부분, 혹은 제동권선의 주파수에 종속하는 와전류 저항이나 포화가 충분히 고려되어 설명이 가능하다는 것이다. 2개의 기기에 대한 계산 결과가 그림 4에 나타나 있다. 계통의 영향은 구성 회로의 리액턴스에 의해 설명이 된다. 주목해야 할 것은 슬립이 작을 때 터빈발전기의 경우는 최대 과전압이 발생한다는 것이다. 계통의 외란 발생중에 개방된 계자회로에 발생하는 전압은 항상 이 제한치 내에 있게 된다.

돌극형의 경우 유기전압의 크기는 시험전압보다 훨씬 크다. $R_E = 10R_F$ 방전저항이 계자권선과 병렬로 연결되면 유기전압이 결코 시험전압까지 미치지 않게 된다. 계자방전 정도에 따라 $(1 \sim 15) \times R_F$ 크기의 비선형의 방전저항이 결정된다. 동기기 설계시 여자 장치(차단기 등)의 형태도 고려되어야 한다. 방전저항은 회전형 여자의 경우 영구적으로 붙어있게 되고 정지형 경우 그림 6과 같이 구성되어 설정 전압이 되면 회로에 자동 연결되는 과전압 방지 소자도 있다

2.2 과전압 억제회로

최근 대용량 정지형 여자시스템은 직류단의 과전압을 소멸시키는 장치로 싸이리스터 반도체를 사용하여 제한시키는 방식이 주로 사용된다.

2.2.1 크로바 동작 전압 설정

크로바 회로의 동작전압 설정치는 회전계자권선과 컨버터의 각소자에 미치는 영향을 고려하여 손상되지 않는 범위 내에서 동작하도록 하여야 한다. 크로바 동작기준을 살펴보면, 첫 번째로 발전기 측면에서 과전압 유기시 회전계자에 영향을 주지 말아야 하므로 다음과 같다.

$$V_{CR \max 1} = 0.8 V_{pref} \quad (1)$$

$V_{CR \max}$: 크로바 동작 최대전압

V_{pref} : 회전계자의 테스트 전압의 실효치

또한, 두 번째의 고려대상인 컨버터의 다이리스터에 영향이 없도록 하기 위해서는 다음식이 만족되어야 한다.

$$V_{CR \max 2} = 2(K_S \cdot V_{RRM} - \frac{V_{V0} \cdot \sqrt{2}}{\sqrt{3}}) \quad (2)$$

V_{V0} : 여자 변압기의 2차측 상전압

V_{RRM} : 다이리스터 최대 반복 피크 역전압

K_S : 다이리스터 전압분배 계수

또한, 실제적으로 V_{RRM} 은 제작사나 다음식(3)으로 개략적으로 구할 수 있다.

$$V_{RRM} = (2.5 \sim 3.0) \sqrt{2} V_{V0} \quad (3)$$

(2)식에 (3)식을 대입한후 K_S 를 0.8로 하면,

$V_{CR \max 2}$ 는 다음과 같다.

$$V_{CR \max 2} = (4 \sim 5.2) V_{V0} \quad (4)$$

(4)식의 결과값을 (1)식과 비교하여 더 낮은 값을 크로바회로의 최대 동작전압으로 결정한다. 그리고 최저 동작전압에 대한 범위는 컨버터 동작중에 최대 발생 가능한 전압으로 $V_{CR \min 1}$ 를 대략 구하면,

$$V_{CR \min 1} \approx 3V_{V0} \quad (5)$$

다른 한편으로는 최저 응답전압은 Field Suppression 동안 회전계자에 유기된 최대 전압보다 커야하므로

$$V_{CR \min 2} \geq V_{RE} \quad (6)$$

여기서, V_{RE} : 필드억제 저항에 나타난 전압

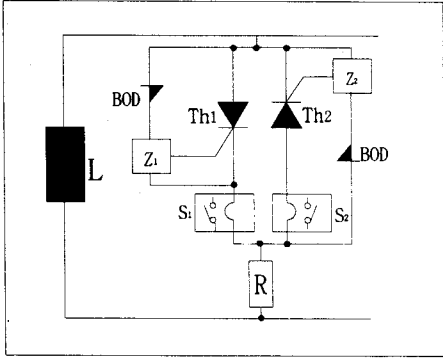
(5)식과 (6)을 비교하여 큰쪽을 최저 전압값으로 결정한다

된다. 최소 응답전압은 (3)식과 (4)식중 가장 큰값을 최소 기준전압으로 한다. 크로바 회로가 동작하게 되는 시점은 위식을 이용하여 최대, 최소값을 이용하여 적정 시간에서 동작하도록 설계하면 된다.

2.2.1 SCR 크로바 회로

싸이리스터 SCR 방식은 그림5 에서와 같이 싸이리스터 2개를 서로 역방향 병렬로 연결하고, 각각의 점호 유니트에서 제한코자 하는 전압 이상으로 계자 전압이 상승하면 해당 싸이리스터를 Turn-ON시켜서 FDR을 통해서 계자 코일 회로와 단락 회로를 구성하여 축적된 에너지를 방출하여 소멸시키는 방식이다. 점호 유니트는 BOD(Break Over Diode)소자를 주로 사용하고 있으며, 방전 전류량을 검출해서 제어정류기 및 발전기를 비상정지 하도록 하는 방식으로 100msec이내의 응답 특성을 갖고 있다. 발전기가 탈조시에는 계자 회로 정극성측이 과전압이 되고 단락시에는 음극성측이 과전압이 발생함으로 해당된 싸이리스터가 도통되어 과전압을 억제시킨다. 그런데 정상 운전중에 발전기가 일시 탈조되거나 비동기 운전이 되었거나 또는 기타 오부 요인에 의해서 계자회로의 정극성측에 과전압이 발생되어 싸이리스터가 도통되면 싸이리스터의 고유 특성상 전류차단이

gate를 통해서 불가능하므로 결국 시스템 정지가 필연적인 사실이다.



L : Rotor Inductance
 R : Current Limiting Resistor
 Z1,Z2 : Firing units Th1,Th2 : Thyristors
 S1,S2 : Current Measurement BOD:Breakover Diode

그림5. 과전압 억제회로인 크로바회로

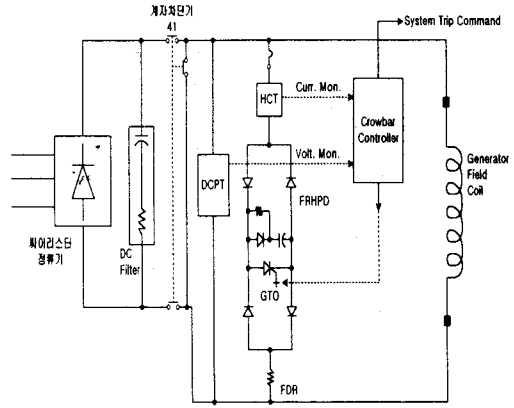


그림7. GTO Crowbar 및 계자회로

전류 검출 연산 회로에서는 Crowbar회로의 GTO가 Turn-on되어 과전압을 억제하고 있는 동안에 Positive 또는 Negative 전류는 FDR(Field Discharge Resistor)를 통해서 흐르게 되는데 이 전류를 검출하여 설정된 값 이상의 전류가 정해진 시간 이상 흐를 경우 여자시스템의 계자 차단기 및 발전기 주 보호장치를 비상정지토록 하는 명령 신호를 받게 된다.

FDR의 열에너지 방산 능력을 고려하여 전류의 크기와 도통 시간을 결정하는데 통상적으로 FDR의 온도 정격을 고려한 시간 정격은 10초 이하이다.

그림8은 과전류 제어 논리를 Timing Chart로 설명한 것으로 과전압이 발생되어 GTO가 ON되고 전류가 흐르기 시작하는데 이때 FDR 허용 정격이내의 전류가 흐를 수 있는 시간은 4초 이내이다. 4초 이내에 다시 GTO가 OFF되면 과전류 검출기는 OFF 될 것이고 이로부터 2초후에 T1 OFF Delay Timer는 다시 ON되어 T2 ON Delay Timer의 동작을 막고 있다. 그러나 과전압이 계속되어 과전류의 지속시간이 4초를 넘어설 경우 T2 Timer는 동작하여 여자시스템 및 발전기 비상정지 명령 신호를 받게 된다. 과전압의 지속 시간은 관련 논문을 참고하면 1초 이하의 아주 짧은 시간 동안으로 발표되고 있다. 한편 Crowbar Controller의 다른 기능으로는 일단 GTO가 Turn ON하면 경보를 발하여 운전원에게 알려주고 4초 이상동안 도통 되어 비상정지 명령 신호를 발해서 계자 차단기 및 기타 Field Suppression등의 후속조치를 순차적으로 수행한다. 그리고 과전류로 비상정지 신호를 발한후에는 자동적으로 Reset되지 않고 운전원이 확인후 현장 판넬에서 Reset시키도록 회로 로직이 이루어져 있다.

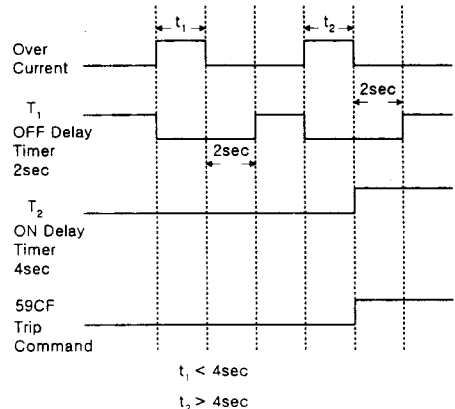


그림8. GTO Gate Control Timing Chart

2.2.2 GTO 크로바 회로

2.2.2.1 GTO Crowbar Controller Circuit

Crowbar Controller는 그림6 블록도에서 나타낸 바와 같이 OP Amp를 이용한 연산기와 간단한 논리 연산 소자, 그리고 Timer Relay로 구성되어 있다. 수초 이하의 짧은 시간 동안 발전기 출력단에서 3상 단락이나 선간단락 또는 발전기의 탈조등의 경우에는 발생된 과전압의 에너지량의 미소하므로 GTO를 Turn-on하여 전류를 방전시킴으로써 효과적으로 과전압을 억제하고 다시 전압이 안전치 이하로 하강한 후에 GTO를 Turn-off하여 굳이 발전기 비상정지까지는 시키지 말자는 것이다.

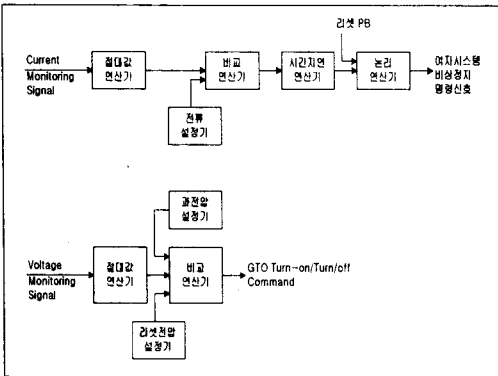


그림6. Crowbar Controller 블록선도

회전 계자 시험 전압의 실효치로부터 산출된 값과 싸이리스터 최대 반복 피크 역전압과 여자 변압기 2차측 상전압을 기준으로 해서 구한 값과 비교해서 낮은 값을 Crowbar 최대동작 설정치로 하는데, 과전압 검출 연산 회로에서는 이 설정치와 직류 전압 변성기로부터 검출된 계자 전압과 비교하여 계자 전압이 설정치를 상회하면 즉시 GTO를 ON하라는 점호 명령 신호를 발하고, 식 5와 6에서 구해진 계자전압 안전치 이하로 하강하면 OFF하라는 명령을 하여 ON/OFF 제어를 수행한다.

그림9는 인천화력 4호기 300MW 정지형 여자시스템에 적용된 Crowbar의 사진이다.

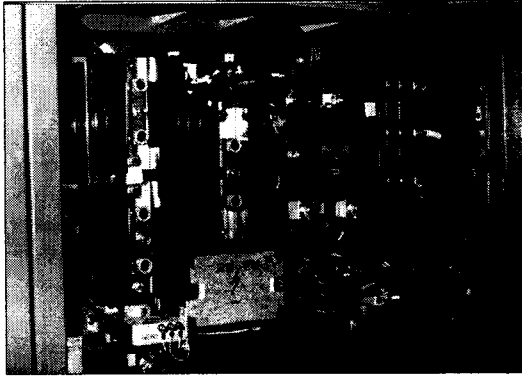


그림9. 300MW 발전기에 적용된 여자시스템

Gate Turn-Off Thyristor와 쾌속 다이오드를 연결하여 계자 회로의 과전압과 Crowbar를 통해서 흐르는 전류를 효과적으로 ON-OFF 제어하여 Crowbar 단락 회로를 동작/개방시킴으로써 일방적인 발전기 여자시스템의 정지를 막을 수 있다. 단 SCR방식은 외부 전원 없이 자체의 전력으로 BOD가 동작하여 점호신호가 발생되는데 반하여 GTO방식은 별도의 제어전원을 필요로 하고 GTO Drive 장치 및 쾌속 다이오드를 추가해야 함으로 시스템 구성상 복잡하고 경제성이 떨어진다. 그러나 대용량 발전기가 1회 정지시 기동전력비, 지장전력비등을 고려할 때 충분한 경제성을 내포하고 있다.

표1. Crowbar 반도체 소자 특성

GTO		DIODE	
I_{TROM}	1,500A	$I_{F(AV)}$	810A
I_{DRM}	2,500V	V_{DRM}	3,000V
I_{TSM} (10ms)	10KA	I_{FRMS}	1,275A
di/dt	400A/ μ s	T_{TT}	100A/ μ s
I_{ij}	-40~125 $^{\circ}$ C	I_{vj}	175 $^{\circ}$ C

3. 결 론

300MW 이상의 대용량 동기 발전기 정지형 여자시스템 계자 회로내에 발생된 과전압을 효과적으로 감쇄시켜 회전자 권선을 보호하고 사이리스터 컨버터 소자를 보호하는 본연의 임무를 수행하면서 보조적으로 발전소 비상정지를 효과적으로 방지하여 전력회사가 추구하는 안정적인 설비운용을 도모할 수 있다는 것이 GTO Crowbar의 최대의 장점이다. 본 논문을 통하여 발전기 계자회로 주변의 고전압 현상과 이에 대한 효과적인 대처 방안을 검토 하였다. 특히 수천 암페어의 전류가 흐르는 계자회로 직류단에서 발생되는 과전압 현상을 기존의 SCR Crowbar 방식이 갖는 속도 응답성 제어성을 모두 수용한다.

(참 고 문 헌)

- (1) F.Peneder, H.Herzog: Modern excitation equipment for hydro-electric generators. Brown Boveri. Rev.67 1980(2) 141-151.
- (2) H.Gandert : Erregungssysteme fur grosse Generatoren. BBC-Nachr. 62 1980(10)380-387.
- (3) M. Canay, J-J. Simond : Rotor overvoltages and

interturn voltages in the field winding of synchr machines. Brown Boveri Rev. 67 1980(9) 516-523.

(4) H. Herzog and J. Deak, Baden "Protecting the Static Excitation Equipment and Rotor Windings of Synchronous Machines Against Overvoltages." Brown Boveri Rev. 6-82, pp 207-211

(5) Herbert M. Lawatsch Janis Vitins, "Protection of Thyristors Against Overvoltage with Breakover Diodes." IEEE Vol.24, No. 3, pp 444-448 1988.

(6) "Monitor both voltage and current levels to protect your power supply and load" Electronic Design 25, December 6, 1978.

(7) George R. Lyuta and Thomas A. Weil "Rapid Recycle Crowbar Circuits." Raytheon Company Wayland, Mass. pp 217-226.

(8) I.M Canay, "Investigation of the rotor overvoltage in synchronous machines with rectifier excitation." Electric Machines and Electromechanics, Vol. 3, pp. 21-38, 1978

(9) 류호선, 임익헌(전력연구원) 여자시스템과 동기발전기의 회전자 권선에 발생되는 과전압에 대한 보호회로 연구. 전력전자학술대회 논문집 1997.188~192.