

여자시스템과 동기발전기의 회전자 권선에 발생하는 과전압에 대한 보호회로 연구

류호선, 임익현
전력연구원

The study of the protection circuit about overvoltage between excitation system and synchronous machines

H.S.RYU, I.H.LIM
KEPRI

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 verified through experiment.

서론

전력수요가 증대함으로써 대형 화력플랜트 및 원자력 플랜트가 전력공급의 기저부하를 담당하고 있다. 그러나 예기치 못한 발전소의 불시 고장정지로 전력계통의 전원교란이 자주 발생하여 이를 최소화하여 안정적인 양질의 전력을 공급하는 것이 전력회사의 주된 임무중의 하나가 되었다. 특히 발전기 여자 시스템을 포함한 계측제어설비가 불시 고장정지 원인의 상당수를 차지하고 있는데 본 논문은 여자 시스템의 전력변환 정류회로 주변에서 내적 또는 외적요인에 의해서 발생된 과전압으로부터 효과적으로 시스템을 보호하면서 비상정지를 최소화 할 수 있는 방안에 대한 연구를 하였다. 발전기 출력 단에서 여자 변압기를 연결하여 전압을 강압한 후 정류기에서 직류전류를 계자코일에 흐르게 하여 발전기 전압을 유지 시키는 여자방식을 정지형 여자시스템이라고 하는데 이는 다음 4개부분으로 대별할 수 있으며,

- ① 전자 제어 시스템
- ② 순차제어 및 보호

- ③ 정류기 및 차단기
- ④ 여자변압기

이런 여자시스템의 각부분에 대한 과전압의 발생 원인과 대책에 대하여 상술하고 특별히 ③항의 다이오드 정류기와 발전기 계자사이에 발생하는 과전압에 대한 억제책을 새로운 방식으로 개발 적용한 사례를 설명하였다. 이 과전압 발생원인으로는,

- 1) 발전기 주변압기의 3상 단락회로.
- 2) 발전기 주변압기의 선간 단락 회로.
- 3) 동기발전기의 탈조 등.

이 있는데 이런 현상에 대해 발전기 계자측에서의 과전압 현상이 발생하였을 경우에 기존의 SCR를 이용한 크로바회로는 과전압 발생시 시스템을 정지했으나 GTO의 ON-OFF 현상을 이용한 크로바시스템은 일정범위의 서지성 과전압에 대해서는 안정운전을 계속할 수 있게 제안함으로써 순간적인 서지현상은 물론 이상 과전압시에 발전기 및 여자시스템을 보호할 수 있게 구성하였다.

본론

1. AC측에서의 과전압

AC측에서의 과전압은 전력시스템의 과도 스위칭 상태나 송전선의 과전압유도에 의해서 발생 될 수 있다. 보통 전송선로는 여자 변압기와 병렬로 연결되어 있는데 기존 시스템은 동기기의 출력 단자에 설치된 Surge Arrestor에 의해서 안정한 전압으로 제한된다. 또한, 전기자 권선의 용량성 성분은 펄스 형태의 전압을 평활 시키는 역할을 한다. 또한 과전압에 대한 보호는 동기기의 전기자 권선에 여자 변압기가 직접 연결되지 않았을 때는 여자 변압기 2차측에 접지된 콘덴서를 병렬로 연결

하거나 여자 변압기 1차와 2차측 사이에 땅으로 된 접지선을 연결한다.

2. 여자 변압기 및 컨버터의 개방(절단)에 의한 과전압

1) 큰 계자전류가 흐르고 있는 계자권선을 차단했을 경우 회전자 권선이 갖는 인덕턴스 성분 때문에 계속해서 전류를 흐르려고 하나 흐를 수 있는 통로가 없을 경우에는 매우 높은 과전압이 유기된다. 이때 효과적으로 여자시스템의 컨버터를 프리휠링시켜 과전압을 방지한다.

2) 여자 변압기가 갑작스럽게 무부하 상태로 단속되었을 때 이미 자기에너지에서 전기에너지로 변환된 에너지는 충분히 큰 콘덴서에 의해서 흡수되어지지 않으면 과전압을 유기한다.

3. 전력 반도체 스위칭 소자에 기인한 과전압

다이리스터를 이용한 전력회로에서 다이리스터가 Turn-on 혹은 Turn-off 될 때 다이리스터의 손상 및 오동작을 막기 위하여 보호회로를 추가한다. 즉, 다이리스터가 Turn-on 될 때 갑작스런 전류변화를 (di/dt)에 의한 다이리스터의 손상을 막기 위하여는 각 상마다 리액터를 연결한다. 또한

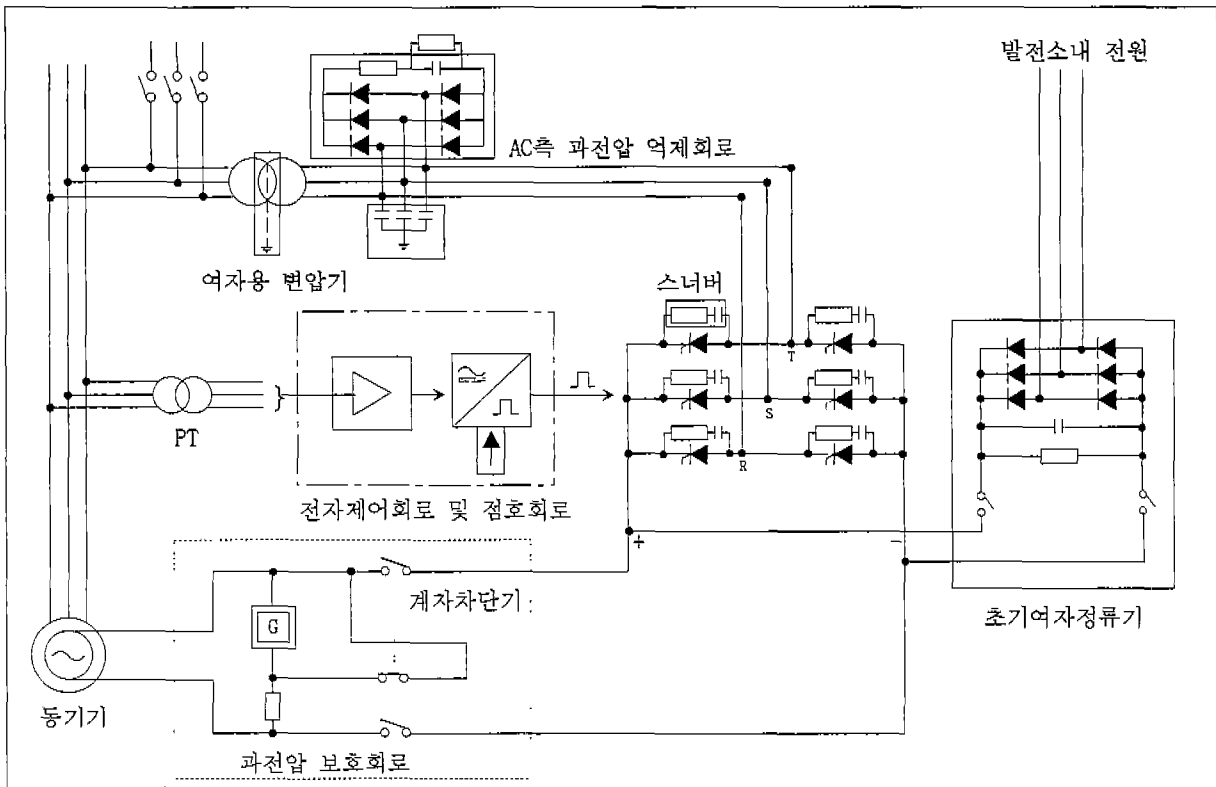
다이리스터가 Turn-off될 때 인덕턴스 및 다이리스터의 내부에 축적되어 있던 역회복 전하(Reverse Recovery Charge)에 의한 역전압 스파크(Reverse Voltage Spike)와 전압 변화율 (dv/dt)을 제한하기 위하여 다이리스터와 병렬로 R-C 스너버 회로를 설치한다. 다이오드나 다이리스터들은 정류되는 동안 전류가 갑작스럽게 Zero로 될 때 순간적으로 역으로 전류가 흐르는데 이때 발생된 과전압은 주로 소자의 보호를 위해서 스너버회로를 연결하면 효과적으로 과전압 유기를 억제 할 수 있다.

4. 회전계자측에서 발생될 수 있는 과전압

여자 제어 시스템의 컨버터 전류는 한쪽 방향으로 흐르게 설계되었으므로 컨버터 후단 DC측에서의 과전압은 주로 역 전류가 흘러 컨버터 양단에 과전압을 유기한다. 다음은 이런 현상에 대해 기존의 시스템과 개발된 시스템을 비교하였다.

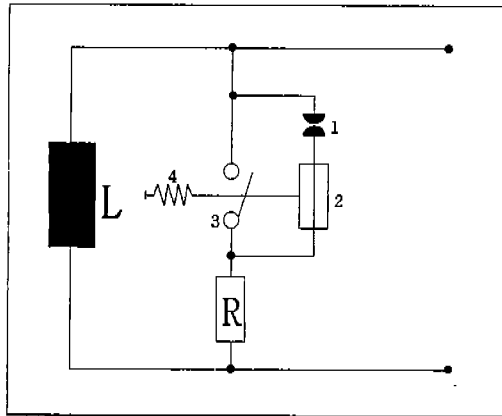
4.1 HCK 형태의 과전압 차단기

과전압은 BBC사 등에서 제안한 2가지 형태의 과전압 보호회로에 의해서 차단될 수 있는데 첫 번째는 HCK형태로 [그림2]에서 보는 바와 같이 퓨즈가 과전압에 의해 끊어졌을 때 스프링 동작으로



[그림1] 과전압 제한 장치를 가진 여자기 시스템의 기본회로

로 3번 스위치가 5ms안에 on되어 R로 전류가 흐르게 되어 에너지를 흡수하게 설계되어 있다.

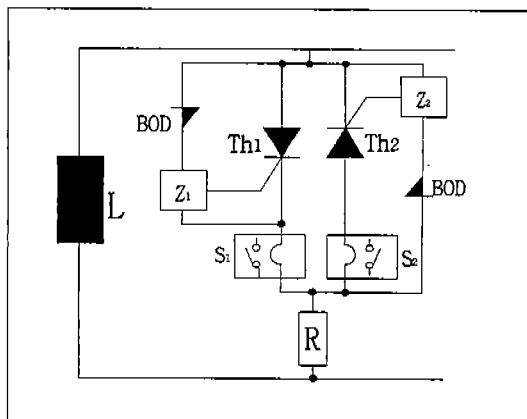


1 : Spark gap 3 : Main Contact
2 : Fuse Wire 4 : Tensioning Spring

그림 2. HCK 형태의 과전압 차단기의 기본원리

4.2 BOD를 이용한 전형적인 크로바 회로

크로바 회로의 기본적인 구조는 역병렬로 연결된 다이리스터와 점호회로로 구성되어 있다. 다이리스터 점호부의 전류는 각각의 감시 릴레이에 의해서 감시되며 과전압이 유기될 경우 BOD소자가 도통하여 점호회로부에 전류가 흘러 다이리스터가 동작하게 된다. 또한 다이리스터가 도통되었을 때 전류 제한저항 R는 과전류 제한 소자의 역할도 하게 된다.



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

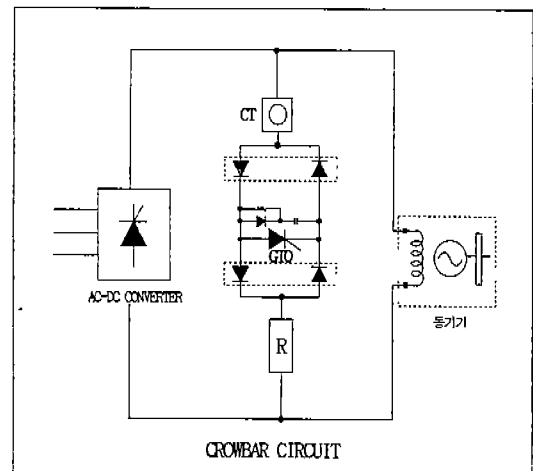
[그림3] 과전압 억제회로인 크로바회로

4.3 제안한 크로바 회로

크로바회로 홀로 모든 과전압에 대한 보호를 할 수 없다. 그러나 다음 사항을 준수 한다면 어느 정도의 과전압에 대한 보호가 이루어질 수 있다.

- 비교회로의 동작 시점
- 응답속도
- 크로바회로의 위치
- 크로바 방전 저항값 결정

전형적인 크로바 회로는 BOD를 사용하여 적정 전압 이상의 전압이 유기되었을때 BOD가 동작하여 다이리스터를 도통시키고 일단 도통이 되면 전원측으로부터 계속적인 공급전력 때문에 차단이 불가능 했다. 그러나 본회로에서는 [그림5], [그림6]에서 보는 바와 같이 비교기가 과전압발생시 센서역활을 하여 과전압이 발생되면 비교기가 미리 설정한 값이상이 되었을 때 GTO가 도통하도록 설계되었다.



[그림5] GTO를 이용한 크로바 회로

4.3.1 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 만족되

어야 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 더낮은 값을 크로바회로의 최대 동작전압으로 결정한다. 그리고 최저 동작전압에 대한 범위는 컨버터 동작중에 최대 발생 가능한 전압으로 $V_{CR \min 1}$ 를 대략 구하면,

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

다른 한편으로는 최저 응답전압은 Field Suppressi-on동안 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 결정하면 된다. 최소 응답전압은 (3)식과 (4)식중 가장 큰값을 최소 기준전압으로 한다. 크로바 회로가 동작하게되는 시점은 위식을 이용하여 최대, 최소값을 이용하여 적정 시간에서 동작하도록 설계하면 된다.

4.3.2 크로바회로의 소자 및 동작시점 결정

[그림5]에 나타난 GTO의 동작 시점을 결정할때의 고려대상은 다음과 같다.

① 저항 R값 결정

저항 R값의 결정[5]은 다음과 같은 식으로

$$R = (1 \sim 15) \times R_f(\text{필드저항}) [\Omega] \quad (7)$$

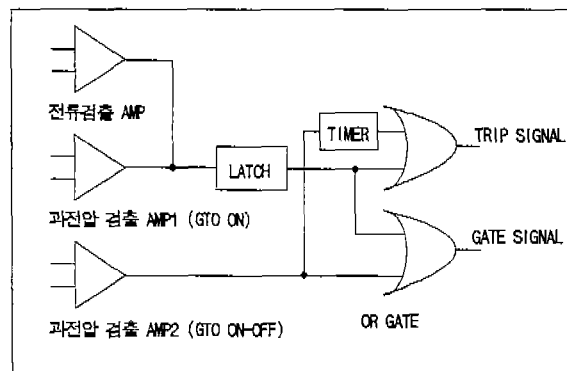
의 범위내에서는 발전기 계자를 보호할 수 있으며, 컨버터 부분과 저항(R)의 용량을 고려하여 저항 값을 결정한다.

② GTO가 ON 상태를 유지할 시간(Trip 시간)

크로바 설계시 대용량 발전기의 회전계자와 연결된 곳은 수천전류가 흐르므로 순간적으로 큰전류를 견딜수 있는 저항 R의 용량이 있어야 한다. 그러나 저항의 용량이 커짐에 따라 저항의 크기도 커지기 때문에 공간문제를 고려한 저항선택과 그 저항의 용량이 견딜수 있는 시간의 최대값을 GTO-ON상태로 유지시킴이 바람직하다. 따라서 W_{MAX} (저항의 최대 용량)가 견딜수 있는 시간이 GTO-ON 유지시간 T_Q 과는 비례하는 것을 알 수 있다.

4.3.3 과전압 검출회로 제어회로

이 회로 특징은 전류검출 AMP는 회로에 어느 이상의 전류가 발생되었을 경우에는 발전기 Trip 신호가 나오도록 설계되어있으며 과전압 검출 AMP1과 AMP2는 전압 센서역활을 하여 과전압이 발생되면 일정전압 이상시에는 GTO가 ON-OFF를 반복하여 펄스성 과전압에 대하여 여자 시스템을 보호하며 발전기 Trip 전압을 설정하여 그값 이상 시에는 GTO를 계속 ON시킴과 동시에 장주기 시간이 경과하면 발전기를 정지하게 설계되어 있다.



[그림6] 비교기를 이용한 과전압 검출회로 및 제어회로 개략도

4.3.4 실험결과

제안된 회로의 시뮬레이션은 Pspice Design Center로서 동작특성을 확인한후 실험을 하였다.

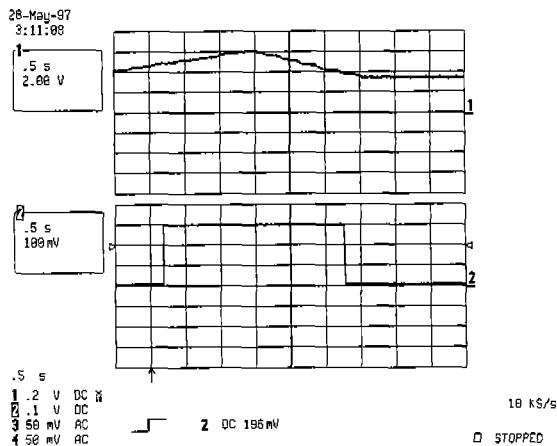
< 실험 >

영동화력 1호기 크로바회로 설계치

- 계자 정격 전압 385 [V]

- 계자 정격 전류 1012 [A]
- 계자 저항 0.322 [Ω]
- 크로바회로 최대응답전압 (GTO ON 유지전압) : 2000 [V]
- 크로바 최소 응답전압 (GTO ON-OFF) : 1500 [V]
- 저항 R값 : 1.61 [Ω]

영동화력의 정격계자전류, 정격계자전압, 발전기의 TEST 전압의 실효치, 계자저항 값을 가지고 크로바회로의 응답전압 및 방전저항 R값은 4.3.1-4.3.2에 언급한 내용을 이용하여 결정하였다. [그림 7]은 실제 크로바회로를 2000[V]이상으로 전압을 상승시켰을 경우의 응답전압 및 게이트 전압파형을 나타내고 있다.



[그림 7] 과전압 발생시 GTO ON-OFF 게이트 전압

결론

본 논문에서는 크로바 회로에 GTO를 적용함으로써 기존의 SCR을 사용하였을 경우에 Turn-On 특성만을 이용하여 에너지가 거의 없는 서지성 전압상승에 대하여 발전기를 정지 하였으나 GTO의 On-Off 특성을 이용하여 발전기 정지를 최소화 하기 위한 방안을 제안하였고, 에너지가 거의 없는 서지성 전압상승에 대한 대처 효과가 상당히 클 것으로 기대가 된다.

참고 문헌

[1] 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

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

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

[4] George R, Lyuta and Thomas A, Weil "Rapid Recycle Crowbar Circuits." Raytheon Company Wayland, Mass. pp 217-226.

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