복권형 여자시스템 De-excitation 설비개선에 관한 연구

이주현, 임익헌, 류호선, 신만수
전력연구원, 전력연구원, 전력연구원, 전력연구원

A Study of de-excitation improved equipment for compound-controlled rectifier excitation systems

J.H. Lee, I.H. Lim, H.S. Ryu, M.S.Shin
KEPRI, KEPRI, KEPRI, KEPRI

Abstract - 전력수요의 증대로 발전소 운전에 핵심적인 역할을 담당하는 제어시스템의 중요성이 한층 더 강조되었다. 본 연구에서는 발전기 전압제어를 담당하는 여자시스템의 독특한 형태인 복권형 P-bar 여자시스템과 De-excitation 설비에 대하여 기술하고, Y원자력 발전소에서 경험하였던 De-excitation 설비에 계자방전 인덕터(FDI) 사용함으로써 발전기 계자권선에 축적된 에너지를 방전하는데 계자권선 시정수인 Tdo'이 설계치보다 너무 오래 지속되는 문제점을 검토하고, 이를 해결하기 위한 개선방안을 제시하였으며, 이를 유사 발전소에 적용한 결과와 그 효용성을 보였다

1. 서 론

최근 전력수요의 증대로 국내 화력 및 원자력발전소는 대형화되고 복잡화 됨으로써 발전소 운전의 핵심적인 역할을 담당하는 제어시스템의 중요성이 한층 더 강조되고 있다. 발전소의 제어시스템 중에서 발전기 전압제어를 통해 전력계통의 안정과 양질의 전력공급의 중요한 부분의 역할을 담당하는 여자시스템은 동기발전기의 계자권선에 직류 전류를 공급하여 계자전압을 조정하고 계자전류를 제어하는 기능을 담당하는 것으로 전력계통의 만족스러운 성능 구현에 필수적인 보호기능과 제어기능을 수행하는 것이다. 발전기 운전 중 계자 권선에는 흐르는 전류로 인해 자장의 형태로 큰 에너지가 저장되어 있는데, 동기 발전기 출력 측의 3상 단락, 동기 탈조 등의 사고 발생시에는 발전기 계자 권선에 큰 과전압이 발생된다.

De-Excitation 설비는 전력계통의 사고 및 발전기 운전 정지시 발전기 운전 중에 계자권선에 자장의 형태로 저장된 큰 에너지를 효율적으로 소비시키면서 발전기 전압 또한 쾌속 소멸시키는 역할을 하는 것으로, De-Excitation 설비의 설계 오류나 동작 부족이 생긴다면 계자 권선에 저장되어 있던 에너지 소모가 지연되고, 이를 효과적으로 제한하지 못할 경우에는 계자 코일의 소손과 전력용 반도체인 싸이리스터와 다이오드에 과도한 역전압이 인가되어 손상을 입을 수 있다. 최근 전력연구원에서 개발된 정지형 여자시스템에서는 발전기가 운전을 정지하게 되면 계자 권선에 저장되어 있던 에너지를 발전기 정지와 동시에 싸이리스터 제어 정류기를 일정시간 인버팅으로 작용하게 하여, 저장된 에너지를 전원으로 회생시킨 후 De-Excitation 회로의 저항과 계자저항를 통해 열로 소비되어 소멸하게 된다.

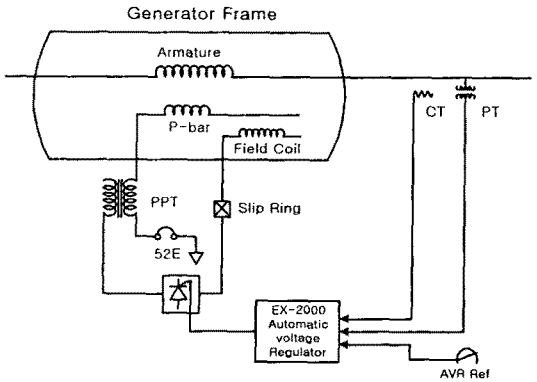
본 논문에서는 여자시스템의 독특한 형태인 P-bar 복권형 여자시스템과 De-excitation 설비에 대하여 기술하고, 실제 Y원자력 발전소의 De-Excitation 설비에서 발생하였던 문제점을 검토하여 개선방안을 제안하였으며, 이를 유사 발전소에 실증 적용한 결과와 그 효용성에 대해 기술하고자 한다.

2. 본 론

2.1 P-bar 복권형 여자시스템

Y원자력발전소에 적용된 발전기용 여자 시스템은 정지형 여자 시스템의 일반적인 형태인 발전기 단자에서 여자용 변압기(PPT : Power Potential Transformer)를 이용하여 발전기 여자 전원을 공급받는 형태가 아니라, [그림 1]에서 보는바와 같이 발전기의 고정자(Stator)인 전기자 권선과 함께 P-Bar라는 코일을 삽입하여 이곳에서 유기된 기전력을 PPT를 거쳐 여자용 전원으로 공급받고 있는 아주 독특한 시스템으로 구성되어 있다.

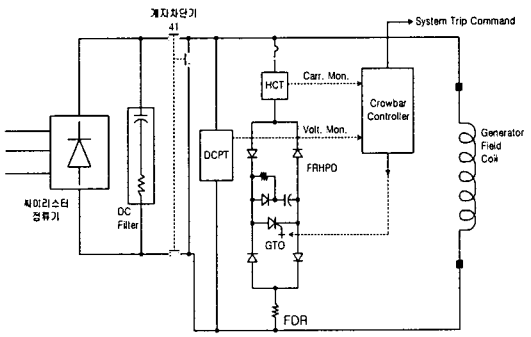
이러한 방식의 정지형 여자 시스템은 일반적으로 발전기 단자로부터 PPT를 통하여 여자 전원을 입력받는 방식에 비하여 이론상 안정적인 운전을 수행할 수 있다. 즉 여자 전원이 계통과 분리되어 독립된 전원을 사용함으로써 여자 전원이 계통의 영향에서 벗어 날 수 있다. 전력계통에서 지락사고 등 계통 사고 발생시 계통 전압이 흔들리게 되고, 특히 계통 전압이 저하할 경우 발전기 단자전압이 저하되어 여자를 강화하여야 함에도 여자 전원 전압이 감소하는 역작용이 발생하게 되어 여자 강화에 지장을 초래한다. 여자를 강화하여야 함에도 적절한 조치가 수행되지 않을 경우 발전기의 안정도에 나쁜 영향을 주게 되어 자칫 동기 탈조로 발전기가 계통에서 분리되는 경우가 발생할 수도 있다. 그러나 P-Bar를 사용하는 경우에는 여자용 전원이 계통전원과 분리 독립되어 있음으로 계통 사고 시에도 여자 전원을 안정적으로 확보할 수 있어 여자 강화 필요시 충분히 대응할 수 있으며 이로 인하여 발전기의 안정도를 향상시키게 된다.



[그림 1] 복권형 P-bar 여자시스템

2.2 De-excitation 시스템

동기 발전기 출력 측의 3상 단락, 동기 탈조 등의 사고가 발생할 경우 발전기 계자 권선에는 큰 과전압이 발생된다. 이를 효과적으로 제한하지 못할 경우에는 계자 권선의 소손과 전력용 반도체인 싸이리스터와 다이오드에 과도한 역전압이 인가되어 손상을 입을 수 있다. 과전압 보호 형식은 정류기 정류 방식에 종속적이며, 3상 싸이리스터 브릿지 시스템에서는 써지 보호책으로 MOV(Metal Oxide Varistors)나 Seleniums 또는 Thyrites를 보통 사용하고, 6 싸이리스터 브릿지 시스템에서는 크로바(Crowbar)라고 하는 회로에서 과전압 검출 및 전압 감쇄회로(SCR 또는 GTO, FDR : Field Discharge Resistor)를 써서 과도 전압을 억제시킨다. 전압 감쇄 역할을 하는 De-Excitation 회로는 발전기 운전 중 계자 권선에 전류가 흐를 경우 $\frac{1}{2}Li^2$의 에너지가 자장의 형태로 저장되어 있는 에너지를 발전기가 사고 및 운전을 정지하게 되었을 때 계자 권선에 저장되어 있던 에너지를 소멸시키기 위해 FDR 저항과 계자저항에서 열로 소비하게 된다. 일반적으로 최근 개발된 정지형 여자 시스템에서는 발전기 정지와 동시에 싸이리스터 제어 정류기를 일정시간 인버팅으로 작용하게 하여 저장된 에너지를 전원으로 회생시킨 후 De-Excitation 회로 내의 저항과 계자저항에서 열로 소비시키는데, 이 경우 저항에서 소비되는 에너지는 $i^2(R_f+R_d)t$에서 t의 시간이 필요하게 된다. 이때 일정 에너지에서 저항이 클 경우에는 에너지가 곧 소멸되나 저항이 작거나 인덕터(Inductor)를 사용할 경우는 시간이 길어지게 된다. 계자 권선에 축적된 에너지를 방전하는 FDR(Field Discharge Resistor)저항은 크기가 작을 수록 계자의 전압이 더 작게 억제될 수 있는데, 문헌을 참조하면 계자 저항의 1~15배로 계자 방전 저항을 설계하지만 일반적으로는 계자 저항의 4~5배 정도의 계자 방전 저항을 설치하고 있다.

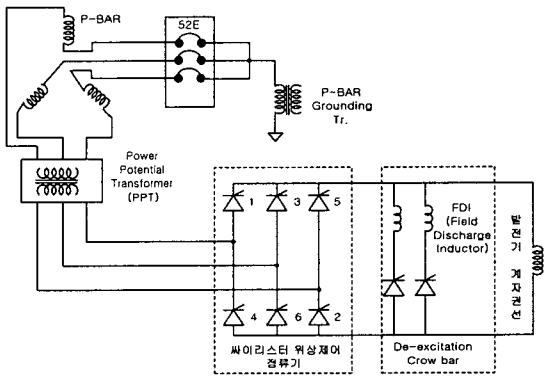


[그림 2] De-excitation회로 및 계자회로

2.3 현재 설치된 De-excitation 시스템의 문제점

Y원자력 발전소에 현재 설치된 여자 시스템은 GE사의 고유 모델인 GENERREX형의 EX-2000시스템으로 시스템의 구성은 [그림 3]에서 보는바와 같이 P-Bar를 Star(Y) 결선하여 접지하고, 접지 측에 교류 차단기가 설치되어 있으며, 이 차단기를 이용하여 계자전원을 공급하거나 차단하도록 되어 있다. Y결선되어 중성점이 접지된 P-Bar는 PPT를 통해 강압되어, 곧 바로 3개의 싸이리스터 전파 위상제어 정류기 단자에 연결되어 정류작용이 이루어진다. 3개의 제어 정류기 출력단이 병렬로 연결된 후 발전기의 계자 단자에 연결되어 여자 전류를 공급한다. 기동시에는 초기 여자변압기에서 소내 전원을 강압하여 다이오드 전파 정류기에서 정류된 직류 전압이 곧장 발전기 계자에 공급되어 초기 여자를 수행토록 하고 있다.

여자 시스템은 기동시에 별도의 소내 전원으로부터 받은 초기 여자를 이용하여 전기자 내에 전기자 권선과 함께 설치되어 있는 P-Bar에서 발생된 기전력을 이용하여 여자전원을 확보하는 일종의 자여자 방식으로 발전기 전압을 확립하고, 전압이 정격의 80% 이상이 확립되면 초기 여자 계통은 동작을 중지한다. 전압이 확립된 발전기는 계통에 병입 되고 이 조건에서 P-Bar에서 발전된 여자용 전력을 이용함으로써 계통과 분리되어 독립된 여자 전원으로 정지형 여자 시스템을 운전하게 된다.



[그림 3] 현재 설치된 De-excitation 및 계자회로

현재 설치된 여자시스템의 문제점은 첫째, 싸이리스터 제어 정류기에서 변환된 직류 계통에는 과거 일반적으로 채용되던 직류 계자 차단기가 설치되어 있지 않으며, 둘째, 발전기의 사고로 인한 비상정지 및 정상운전 정지시 발전기 단자 전압를 감쇄시키는 De-Excitation 설비에 FDR이 아닌 FDI가 설치되어 있다. De-Excitation의 관점에서 인덕터(Inductor)의 일반적인 특성을 고려할 때, FDI에서는 저항 성분이 작아 De-Excitation 작용의 효과가 미미하고, De-Excitation 동작이 원활하지 않음으로써 정지후에도 발전기 단자 전압이 지속되어, 어떤 원인으로 인해서 발전기 출력단에 접지가 발생되었을 경우 이로 인하여 접지 전류가 일정시간 흘러서 발전기의 손상의 문제를 일으킬 수 있는 요인이 될 수 있다.

셋째, 싸이리스터 제어 정류기를 지닌 직류 계통에서는 발전기 출력단에서의 큰 지락 고장시에 계자측에서 발생 가능한 Positive 과전압과, 발전기가 탈조(Pole Slip)시의 Negative 과전압(극성이 반대로된 과전압) 발생으로부터 계자 권선과 싸이리스터 정류기 시스템 보호를 위해 Crowbar 회로가 설치되어 있는 것이 일반적이나 현 시스템에서는 설치되어 있지 않았다.

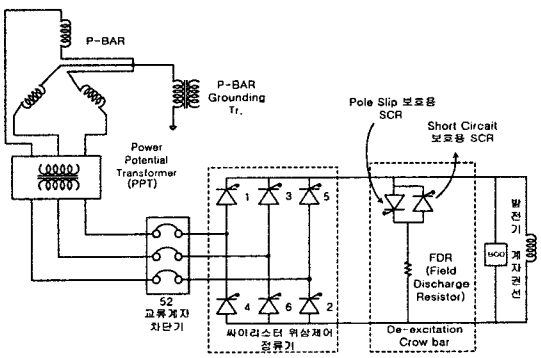
Y원자력발전소에서 경험한 바와 같은 발전기 및 터빈이 정지 되었음에도 접지로 인한 고장 전류가 3배 이상의 정격전류로 약 수초간 계속되었고, 발전기 단자 전압이 수십초간 존재하였음이 확인되었다. 이는 일상 지락 사고나, 또는 예상 할 수 있는 3상 지락 사고 등을 고려할 때 현재의 시스템과 같은 FDI를 사용하는 방식으로는, 이미 경험한 이상의 고장 전류가 흐르는 것은 명확하다고 생각된다. 즉 무부하 운전 조건에서는 여자 전류가 정격 부하 운전 상태에서보다 3배정도 여자전류가 낮은데다 발전기 내부 유기 전압도 낮은 상태이다. 이는 발전기의 유기 기전력 $V=k\Phi n$에서 속도 n는 동기발

전기로 일정하고, 자속에만 비례하는데 자속은 여자 전류에 비례하여 변화하기 때문이다. 따라서 높은 여자 전류로 운전되는 정격 부하 운전 상태에서 접지 사고가 발생한다면, 이때의 내부 유기 기전력은 무부하 운전 조건에서 보다 높은 전압이 되고, 터빈의 운동 에너지도 높기 때문에 이미 Y원자력 발전소에서 경험한 바와 같이 사고발생 정지 직후에도 터빈의 운동에너지가 서서히 감쇄되고, 남아있는 잔류자기($\frac{1}{2} L i_f^2$)로 인해서 발전기 전압이 서서히 소멸되기 때문에 고장전류가 상당기간 지속될 것으로 생각된다.

2.4 De-excitation 설비의 개선 제안방안

발전기, 여자변압기 및 제어정류기 등의 설비보호를 극대화하고 개선 비용을 최소화 하기 위해 가능한 현재의 시스템을 그대로 사용하는 방안을 배경으로 적용 가능한 방안을 제시하면 첫째, PPT 1차에 설치된 교류 계자 차단기를 철거하고 PPT의 2차에 적정 교류 차단기를 신설하고, 둘째, 기존의 교류 계자 차단기에 연결되었던 모든 인터록(Inter Lock)을 PPT 2차에 설치된 차단기로 변경 조치하며, 셋째, 기존의 FDI의 De-excitation 방식을 저항과 열 방출량을 계산하여 적절한 용량의 FDR 방식으로 교체하는 방안을 제시하였다.

[그림 4]는 개선 제안된 De-excitation 및 계자회로를 나타낸 것이며, FDR의 저항값은 계자권선의 저항값과 동일하게 하고, 여기에 흐르는 전류용량은 10초 정격인데 발전기 정격계자 전압의 5~6배의 전압이 인가되었을 때 흐르는 전류로 한다.

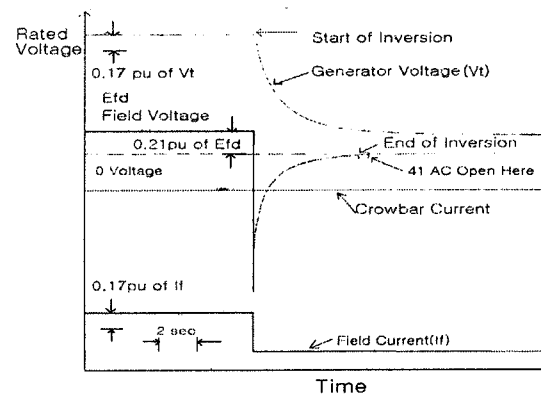


[그림 4] 개선 제안된 De-excitation 및 계자회로

개선된 방안의 회로를 설명하면 여자시스템을 정지하라는 신호가 발생하면 먼저 싸이리스터의 점호각 위치를 인버전(Inversion) 영역으로 최대한 밀쳐서 발전기 계자코일에 있는 에너지를 발전기 출력단에 회생시킨 다음, 위상제어 정류기쪽에 싸이리스터 5번과 2번의 Gate를 열어서 Free Wheeling Mode 절환하면서 교류 계자 차단기를 개방한다. 이 과정에서 계자회로에 과전압이 유기되는 경우에는 계자회로 과전압 검출 및 보호회로(Crowbar)에서 싸이리스터를 점호하여 FDR을 통해서 계자권선과 폐회로를 구성하고, 계자회로에 축적된 에너지를 소멸시켜 결국은 발전기 전압을 급속도로 감쇄시키는 역할을 한다.

2.5 개선방안의 유사발전소 적용결과

아래의 [그림 5]는 2.4절에서 개선방안으로 제안된 회로를 400Mw급 화력발전소에 적용된 디지털 여자시스템에서 정지 명령 후 교류 계자 차단기와 De-Excitation 회로의 동작을 통한 발전기 전압 감소 특성을 나타낸 것이다. [그림 5]에서 보는바와 같이 발전기의 운전 정지 신호와 동시에 싸이리스터 제어 정류기를 일정시간 인버팅으로 작용하게 하여, 계자 권선에 저장되어 있던 에너지를 전원으로 회생시킨 후 De-Excitation 회로의 저항과 계자저항를 통해 발전기 전압이 양호하게 감쇄되는 특성을 확인할 수 있었다.



[그림 5] 정지명령 후 De-Excitation 특성

3. 결 론

본 논문은 여자시스템의 독특한 형태인 P-bar 복권형 여자시스템에 대하여 기술하고, 수년전 Y원자력 발전소에서 이미 경험한 고장 사례를 바탕으로 De-Excitation 설비에서 발생하였던 문제점을 검토하여, 개선방안을 제안하였고, 이를 유사 발전소에 실증 적용한 결과를 통해 그 효용성을 보였다. 발전기 여자 시스템의 De-Excitation설비의 동작 부족으로 인해 계통사고 및 고장정지 사고와 같은 경우에 과전류로부터 발전기 계자권선의 소손 및 전력용 반도체의 보호를 위해서는 기존의 방식에서 개선 방안으로 제안된 Fast De-Excitation방식으로의 교체가 필요할 것이며, 향후 Y원자력 발전소에서 그 결과를 다시 한번 확인할 수 있을 것으로 생각된다.

[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] 임익헌, 이주현 류호선 외 "발전기용 다중화 정지형 디지털 여자시스템 개발" 최종보고서, 전력연구원

[4] 임익헌, 김장묵 "Y원자력 #3, 4 De-excitation 개선 방안", TM.99GC06.P2000.270,전력연구원

[5] 임익헌, "동기발전기 디지털 여자시스템 개발에 관한 연구", 전력연구원, 2001