

동기기 여자시스템 최신기술

임익현, 송성일, 류홍우
(전력연구원 발전연구실 I&C 그룹)

1. 대용량 동기기 여자시스템 기술 일반

동기기 계자 권선에 흐르는 직류 전류를 제어해서 발전기 전압을 조정하고 전력계통에 발생된 계통의 무효전력을 조정하면서 부가적으로 전력계통의 안정도를 증대시키는 역할을 하는 것이 동기기 여자시스템이다. 여자시스템에는 제어기술과 전력전자기술이 종합된 기술이다. 전력산업에서 전력전자기술을 이용하여 전기의 품질을 올리는데 지대한 영향을 미치는 분야가 동기기 여자시스템이다. 여기서 소개하는 기술 동향 자료는 세계최대의 발전기 여자시스템 공급업체인 미국 General Electric 사가 최근에 출시하여 활발히 설치되고 있는 3중화 디지털 여자시스템의 기술을 소개하고자 한다. 국내에서도 이미 3중화 디지털 여자가 개발되어 10여개의 발전소에서 상업운전중이다. 여자시스템은 제어기와 정류기 2개 부분으로 나눌 수 있다.

첫째는 전압을 검출, 목표설정, 제어연산, 제한, 보호기능 등을 수행하는 제어기 부분이 있다. 여기서는 동기기의 전압을 제어하는 기능, 동기기를 보호하는 기능과 여자시스템 자체를 보호하기 위한 여러 가지 제한장치, 보호 장치 경보장치가 포함된다. 디지털 기술의 발전과 병행해서 각종 제어 및 제한, 보호 알고리즘은 점점 인공 지능화 되어서 인간이 생각할 수 있는 모든 알고리즘이 총 집합되어 가는 추세이다.

둘째는 제어기에서 만들어지는 제어신호를 받아서 반도체 스위칭 소자인 다이리스터의 점호각을 제어해서 교류 전력을 직류전력으로 변환하는 다이리스터 위상제어 정류기가 있다. 현재는 직류 전류 2000(A)급의 단위 정류기를 병렬로 연결하여 필요로 하여 계자전류를 공급하고 있다.

여자시스템 제어기의 필수기능은 동기기전압을 자동 조정하는 기능(Automatic Voltage Control), 전력계통에 병렬

운전 중인 동기기의 무효전력을 조정하는 자동역률조정(Automatic Quadrature Control)이 있다. 기타 부가적으로 속응 여자시스템으로 인해서 발생될 수 있는 전력계통의 진동을 억제하기 위한 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer)와 주 승압변압기로 인한 계통 전압 조정 속응성이 떨어지는 것을 해결하기 위해서 승압 변압기 고압측 송전 전압을 제어하는 PSVR(Power System Voltage Regulator) 등이 있다. 이러한 필수 제어기능들은 기술이 이미 포화점에 도달하여 거의 정체 상태에 있고, 일부 전압 제어연산 알고리즘 또는 전력계통 안정화 장치 부분에 현대제어 이론이 접목된 논문들이 발표되고는 있으나 아직 상업화와는 거리가 있는 듯하다.

2. GE사의 최신 기술 동향

2.1 EX-2100 여자시스템

GE사가 1990년대 초반에 시장에 출시한 이중화 방식의 디지털 여자 시스템인 EX-2000에 이어서 EX-2100 3중화 디지털 여자시스템을 상품화 하여 공급 중에 있다. 한곳의 고장으로 시스템 전체 운전이 전혀 지장이 없도록 프로세서, 전원 공급장치, 그리고 중요한 입출력은 3중화 시켜서 MTBFO (Mean Time Between Forced Outages)를 증대시켰다. EX-2100시스템은 GE사에서 상품화 한 디지털 여자시스템 제3세대 제품이다. 1세대와 2세대 제품이 세계 27개국에서 1000여개 발전기에 적용 운전중이다. 2세대 제품인 EX-2000시스템이 우리나라 예서는 소형 가스터빈 발전기에서부터 1000MW 대용량 원자력 발전소까지 38기가 운전 중에 있다. 1세대는 Simplex형 디지털 여자제어기이고 2세대는 Dual channel형 디지털 여자시스템 EX-2000모델이다. 3세

대 제품인 EX-2100은 모든 종류의 여자방식에 적용 가능한 유연한 시스템으로 설계 제작되어 있다. EX-2000시스템이 개별 정류기와 제어기가 모듈 형태의 큐비클 구조로 되어 있는 분산형인데 반해서 EX-2100은 3중화 제어가 제어기 큐비클에 함께 내장되어 있는 중앙 집중방식이다.

2.1.1 EX-2100 디지털 제어기

Ethernet LAN 통신으로 제어시스템 Toolbox, 터빈 디지털 제어시스템, HMI(Human Machine Interface), 그리고 기타 GE 시스템과 연계 되어 있다. 다른 회사들의 분산제어 시스템과의 인터페이스는 RS-232 ModBus를 통해서 지원한다. 그림 1과 2는 EX-2100 시스템을 기능중심으로 그린 단선 블록도이다. 그림 1의 제어모듈 M1과 M2는 각각의 I/O 보오드와 연결되어 있고 2개의 프로세서에서 응용 소프트웨어를 처리한다.

이와 별도로 C 제어모듈이 있는데 여기에는 1개의 프로세서가 있다. 모듈의 보오드는 VME(Versa Module

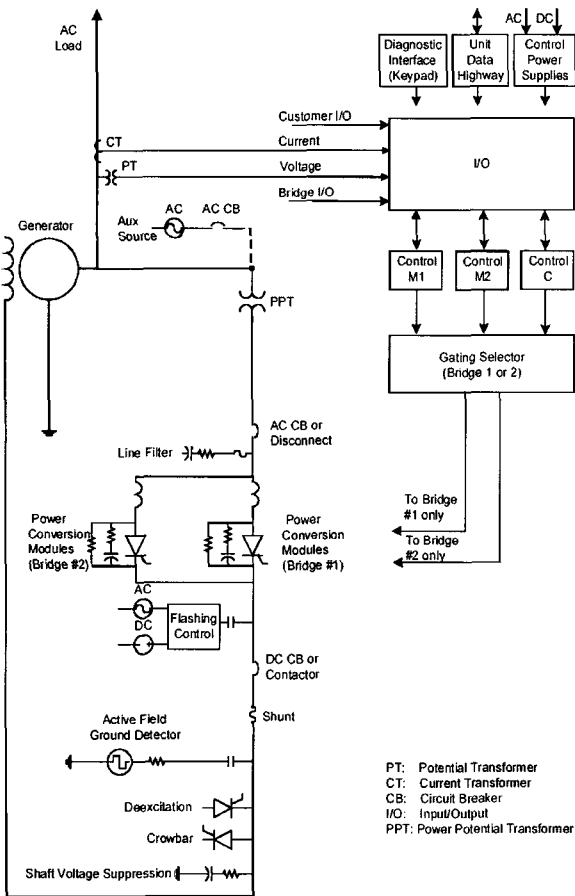


그림 1. GE EX-2100 시스템 단선 결선 블록도

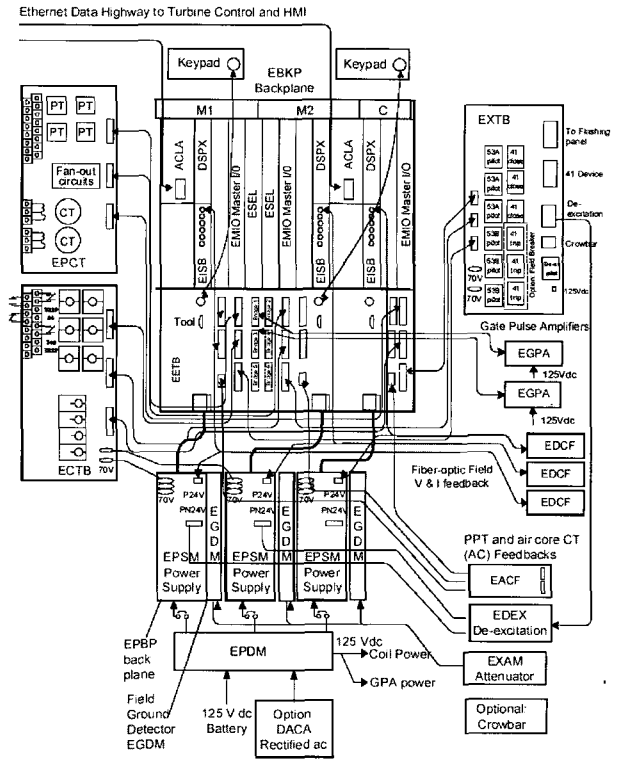


그림 2. EX-2100 제어기의 연결 개략도

Eurocard)구조이다. 그림 2는 EX-2100 제어시스템의 프로세서 보오드와 통신통로를 나타낸 것이다.

□ 제어기 보오드 :

2개의 제어기 보오드가 있다. 먼저 여자시스템의 통신과 제어를 관장하는 보오드가 있는데 VME Rack에 설치된다. 100MHz로 돌아가는 프로세서와 8MB의 DRAM(Dynamic Random Access Memory), 그리고 4MB Flash Memory BIOS가 내장되어 있다. 통신기능은 터빈제어와 HMI 또는

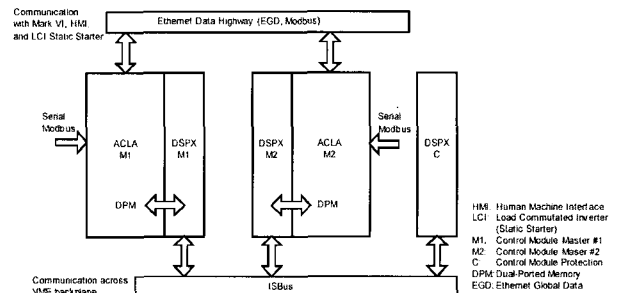


그림 3. EX-2100의 프로세서 보오드와 통신체계

다른 시스템과 Ethernet 통신이다. RS-232, 그리고 Dual Port Memory(DPM)등이다. 수행하는 제어기능은 수동/자동설정, 전압조정, 무효전력제어, 제한기능, PSS 등이다. 주로 Outer Loop, 즉 전압제어 루프를 담당한다. 다음으로 또 하나의 프로세서 보오드가 있는데 이는 Inner Loop, 즉 계자 전압 또는 전류 루프를 담당한다. 앞의 보오드 보다 속도가 빠르다. 프로세서 신호처리 속도는 60MHz이고 248KB 고속 Static RAM과 512KB Flash Memory BIOS를 쓴다. 수행 기능은 계자전압 조정, 계자전류 제한, 기동/정지, 초기여자 경보, 비상정지, 발전기 시뮬레이터와 현장 조작반과의 통신 기능을 수행한다. 그림 3은 EX-2100 제어기의 통신체제와 프로세서 보오드를 나타낸 것이다.

□ 주변 보오드

기타 하드웨어로는 제어모듈 M1과 M2의 특별 통신 연계 보오드가 있는데 광섬유를 사용해서 보오드 내의 DSP사이의 통신을 고속으로 처리한다. M1과 M2에서 만들어진 다이리스터 점호신호를 선택하는 제어 보오드가 있는데 신호의 선택 결정권은 C모듈에 있다. 다중화 레벨을 증대시킬 목적으로 그 보오드를 그룹으로 사용할 수도 있다. Single Bridge Driver에서 6 Bridge Driver까지 확장이 가능하다. 또한 발전기 전압 전류 신호처리 보오드, ON/OFF입력/출력 처리 보오드 그리고 전원공급 모듈이 있는데 Buck Regulator를 써서 125V 직류를 +5, +15, -15, 24 그리고 70V직류 전압을 공급한다. 3중화 제어 모듈별로 제각각 전원공급 모듈을 두어서 신뢰성을 증대시켰다.

2.1.2 위상제어 정류기

□ 게이트 펄스 증폭 보오드

제어기와 정류기와 연계키는 보오드이다. 점호신호 선택 보오드에서 점호명령신호를 받아서 SCR 게이트에 보낸다. 게이트 점호용 전원은 별도의 독립된 절연 전원을 사용한다. 게이트 점호신호를 증폭하는 주된 임무 이외에 브릿지로 인입되는 계자전류 검출, 점호 정상 유무 지시, 전원 공급장치, Line Filter, 냉각팬 회전 감시, 브릿지 Heat sink온도감시, 정류기의 경보 및 고장 상태를 표시 또는 지시한다. 고전압 이면서 대전류가 흘러 유도 노이즈가 큰 정류기 쪽과 제어기 쪽을 전기적으로 절연하고 노이즈 면역력을 증대하기 위해 계자전류, 계자전압 검출 등에 고속도 광섬유 신호선을 사용해서 링크 시켰다. 계자전압 검출기 같은 경우 여러 가지 형태의 전압범위 적용에 다 쓸 수 있는 구조로 하기위해 선택 스위치를 두었다.

De-Excitation 모듈에는 De-excitation SCR 점호 명령신호, 도통유무 검출장치가 있고 모듈의 전원이 상실하더라도 계자 과전압 자체 전원으로 SCR을 점호 하도록 하였다. 그리

고 SCR을 3병렬로 하여 각각의 3중화 된 제어기에서 점호 명령을 받도록 하여 시스템이 신뢰도를 증대 시켰다.

□ Power Bridge(정류기)

다이리스터 브릿지는 동기기의 최적성능을 위해서 Positive 와 Negative Field Forcing이 가능한 Inverting Bridge를 채용한다. Negative Forcing은 부하 급감발 또는 계자 차단시에 속응성 있는 응답을 제공할 수 있다. 브릿지 냉각 시스템은 공랭식이며, 운전 중에도 송풍기를 쉽게 교체 가능한 BOX형 또는 서랍형으로 설계되어 있다. 소프트 웨어 기술기반 위에 SCR 도통감지 회로는 각 SCR 브릿지에서 일어날 수 있는 휴즈의 단선, 점호 펄스 상실, SCR의 개방 또는 단락을 모니터링 한다.

□ 계자 차단 장치

정류기 출력단의 직류를 차단하는 방식과 정류기와 교류 전원측을 분리하는 교류차단 방식 2가지가 있다. 정지 또는 Trip시에 계자 코일내에 저장된 에너지를 효과적으로 방출할 수 있도록 De-excitation시스템과 인터록을 걸기도 하고 정류기를 인버터 모드로 하여 전원측에 회생시킨 후 차단하기도 한다. De-excitation을 하는 Crowbar 회로는 선형 또는 비선형 방전 저항을 통해서 계자 코일내에 있는 저장 에너지를 소멸시킴으로서 차단기 개방시 과전압을 효과적으로 억제시킨다.

□ 축전압 억제기

다이리스터의 轉流 때문에 발생하는 축전압을 대지전압 기준으로 5~7V이하로 억제하기 위해서다. 정류기 출력의 Ripple 전압과 과도상태 전압이 축전압을 발생한다. 轉流할 때의 급속한 전압 상승과 소멸시간을 콘덴서 결합으로 둔하게 하여 축전압을 억제한다.

□ Crowbar 모듈

凹凸형 磁極, 즉 Salient Pole 동기기가 주로 사용되는 수력기와 원통형의 회전자 磁極을 갖는 일부 특수 화력 발전소용 발전기에만 적용한다. 동기기가 계통에서 동기화력을 잃고 탈조 할 때 고정자로부터 회전계자로 매우 높은 전압이 유기될 수 있다. 이로 인해서 계자 코일이나 여자시스템 정류기측을 손상시킨다. 따라서 Crowbar는 효과적으로 과전압을 억제하며 De-excitation System의 기능 속에 포함시킨다. Crowbar용 부하(계자 방전 저항)는 반드시 저항이어야 한다. 탈조로 인해서 발생하는 고전압 유도전류는 정상적인 정류기 출력 전류 방향과는 역방향 전류이다. 그림4는 게이트 펄스 증폭부를 나타낸 것이고 그림5는 위상제어정류기와 모듈간에 인터페이스를 나타낸 그림이다.

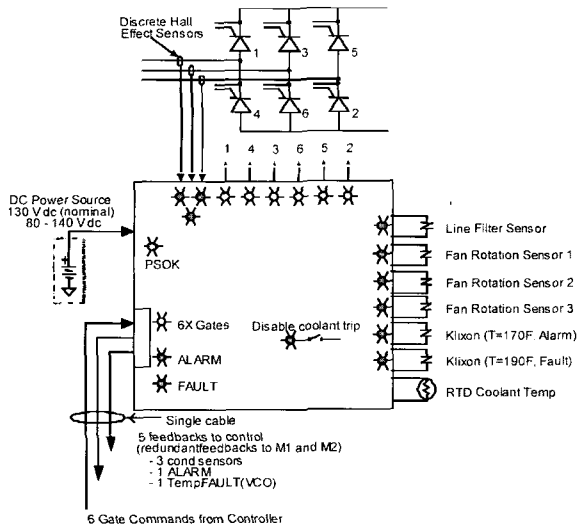


그림 4. EX-2100 위상제어 정류기의 게이트 펄스 증폭부

□ 초기 여자전원공급(Initial Field Flashing) 모듈
 주로 정지형 여자시스템에서 필요한 설비이다. 기동시에 초기 여자전원을 공급하는데 무부하 계자 정격 전류의 15~20%를 공급한다. 축전지에서 제한 저항을 통해서 받던지 교류를 정류해서 공급하는데 시간 정격은 15초 정도이다.

□ 계자회로 접지 검출(Field Ground Detector)
 여자변압기 2차에서 정류기, 그리고 계자코일까지 회로의 접지가 되었는가를 검출하는 장치이다. 발전기 계자전압 크기에 독립적으로 일정한 감도를 갖고 동작하고, 발전기 계자코일내의 접지 위치에 무관하게 일정한 감도를 유지하고, 접지 위치까지를 검출한다. 제어기와의 신호연계는 광섬유 링크 방식이다.

□ 정류기의 다중화(Power Bridge Redundancy)
 개별 브릿지의 단위 전류용량이 직류 2000[A]이기 때문에 여자전류에 따라서는 다병렬 방식으로 해서 정격을 맞추고 1개 브릿지를 예비로 하는 N+1방식이다. N=1일 경우는 Warm Backup 방식으로 해서 예비 브릿지는 점호신호만 금지되어 있다가 운전명령이 떨어지면 금지명령이 해제되어 바로 운전 가능한 방식이다. Warm Backup 방식은 상시 2대 운전방식보다 비용이 절감되는 방식이다. 또한 운전 중에 헌팅 없이 운전 중인 브릿지와 서로 절체가 가능하다.

2.1.3 Software

□ 소프트웨어에 의한 신호 변환(Software Transducer)
 Ex-2100의 높은 성능은 세련된 소프트웨어 신호변환 알고리즘에 있다. 발전기 전압과 전류를 전압 변성기와 전류 변성

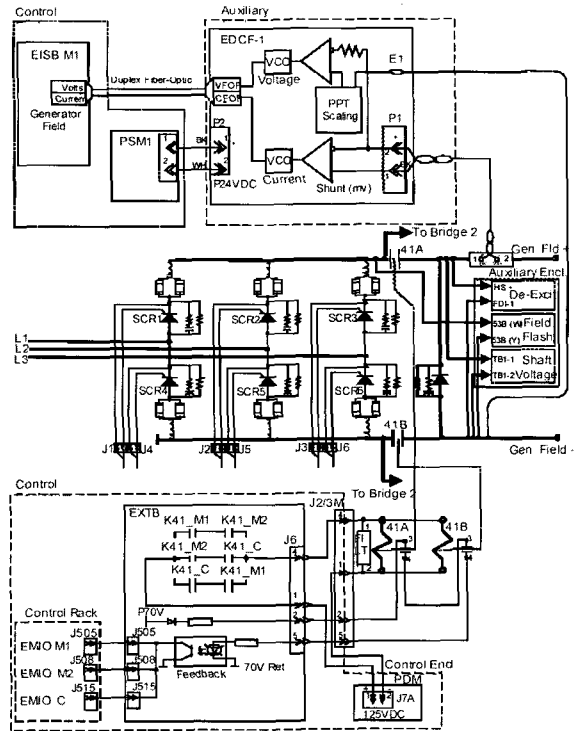


그림 5. 위상제어정류기와 모듈간 인터페이스

기에서 원천 신호를 받아서 필요한 여러 가지 신호를 만든다. 발전기 전압, 유효전류, 무효전류, 주파수 슬립, 자속의 크기, 역률각, 유효전력, 무효전력 등을 만든다.

다음의 그림 6은 EX-2100 여자시스템 제어 및 제한 블록도이다. 기존의 시스템이 가지고 있는 각종 기능을 모두 포함하고 별도의 특이 블록들이 들어있다. 먼저 기존의 블록들을 설명 없이 명칭만 나열하면 다음과 같다. 자동전압 설정기, 부족여자 제한기, 항류보상, 과자속 제한, 자동전압 조정기, 전력계통 안정화 장치, 수동 전압 설정기, 과여자 제한기, 무효전력/역률 조정기 등이다.

다음으로 특이한 기능 블록에는 첫째 고정자 전류 제한 블록이다. 고정자 전류가 정격치를 초과하면 AVR 제어모드에서 VAR 제어모드로 절체 되면서 고정자 전류치를 제한한다. 둘째로 발전기 내부 냉각매체인 수소가스 압력이나 온도가 운전 제한치를 초과하면 부족여자 제한기, 과여자 제한기 고정자 전류제한기의 설정값을 수정하여 발전기가 능력 안전운전 범위내에서 운전되도록 제한 위치를 수정한다. 즉 제한범위를 좁혀서 발전기를 열적손상으로부터 방지하기 위함이다. 또 다른 특성으로 수동운전 제한기가 있다. 자동운전모드 또는 수동 운전시에 미리 설정한 부하대별 수동 설정기 범위 이하로 추종이 되어 수동설정값이 내려가지 못하게 하고, 운전원도 정해진 값 이하로 내리지 못하도록 하는 기능이다. 또한

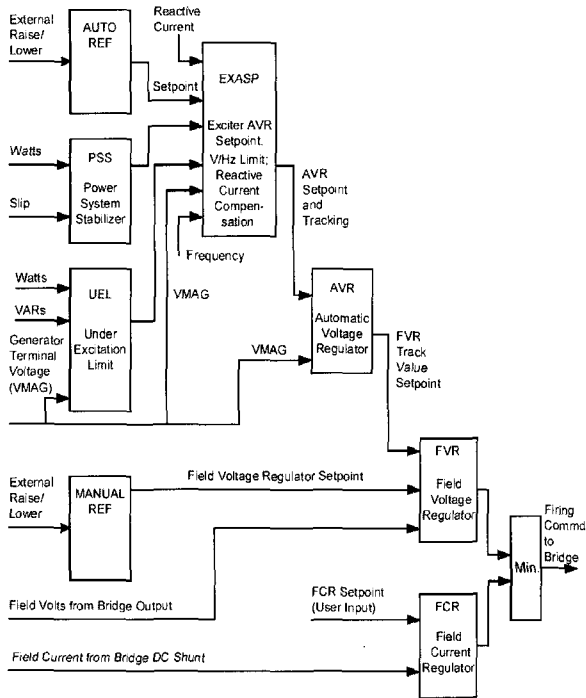


그림 6. EX-2100 시스템의 제어 알고리즘 기능 블록도

여자시스템 소프트웨어 내에 상세발전기 모델을 포함해서 발전기가 정지 중에도 발전기가 실제로 운전하는 것과 같은 동작을 모의해서 운전원을 훈련하거나 각종 조절기, 제한기 보호기능들을 점검할 수 있는 기능이 있는데 이 기능이 Generator Simulator 블록이다.

□ 통신 및 보호 소프트웨어

Ethernet Global Data 프로토콜에 기초한 유니트 데이터 하이웨이는 터빈제어 시스템이나 HMI, PLC등과 연결한다. 또한 제어시스템 EWS인 Toolbox도 지원하며 변수가 제어되고 감시되는 여자시스템에 디지털 창을 제공한다. 이중 DCS 시스템과 연계를 위한 ModBus RTU Slave Data Link를 지원할 수 있으며, 이 때 링크는 RS-232C 또는 Ethernet 10baseT 하드웨어를 지원하는 TCP/IP를 사용한다. 보호 소프트웨어는 Volts/Hertz 트립, 과여자 트립, 발전기 과전압 트립, 전압변성기 휴즈 상실, 부족 여자트립 여자변압기 상 불평형, 무부하 과여자 트립 등이 있다.

3. 결 론

이상으로 GE사의 EX-2100 시스템 기술을 개략적으로 소개하였다. 동기기가 가지고 있는 능력범위 안에서 최적 제어

가 되고 효과적으로 시스템이 제한/보호 될 수 있도록 여러 가지 기술들이 집합되어 있다. 그리고 한곳의 기능 상실이 시스템 전체 정지로까지 확대되지 않도록 시스템을 다중화 시키고 독립화 하였으며 광섬유 신호 링크를 많이 사용하여 노이즈 면역성을 증대시켰다. 그러나 통신 프로토콜을 개방구조로 하지 않아서 GE가 생산/공급하는 제어시스템과는 유기적인 통신연계가 가능하지만 다른 시스템과의 연계는 어려운 구조이다.

끝으로 국내에서 두산중공업 개발자금으로 전기연구원이 개발한 3중화 디지털 시스템이나 전력연구원이 개발하여 확대 적용중인 디지털 3중화 제어기와는 3중화 하드웨어 방식에서 좀 차이가 있다. GE의 자료대로 EX-2100 시스템이 완벽한 3중화 방식인지는 좀더 기술적인 검토가 필요한 사항이다. 다만 아직 국내연구진이 개발하지 못했던 특이 기능 알고리즘(대표적 예 : 발전기 시뮬레이터) 등 몇 가지가 들어 있었다. 전력연구원은 전력산업기반과제로 “승강압형 컨버터를 채용한 디지털 여자시스템”과 “원자력 발전소용 3중화 디지털 제어시스템 개발” 과제에서 신 개념의 동기기 제어/제한/보호 기능 블록들을 연구 개발하여 실기적용을 목표로 두고 연구에 열중하고 있다. 2-3년 이내에 세계최고의 여자시스템이 국내에서 출현되기를 기대해 본다.

《 저 자 소 개 》



임익헌(林翼憲)

1958년 7월 25일생. 1980년 건국대학교 전기공학과 졸업. 1979년 한전 입사. 2002년 홍익대학교 전자공학부 졸업(박사). 2003년 5월 현재 한전 전력연구원 발전연구실 I&C그룹 책임연구원.



송성일(宋成一)

1954년 8월 1일생. 1982년 울산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1984년 한국과학기술원 핵공학(제어계측) 졸업(석사). 1981년 한국전력공사 입사. 2003년 5월 현재 한국전력공사 전력연구실 I&C그룹장.



류홍우(柳洪雨)

1948년 4월 16일생. 1996년 서울대 대학원 졸업(공학). 1967년 한국전력공사 입사. 2003년 5월 현재 한국전력공사 전력연구원 발전연구실장.