대형 연구실험장치인 KSTAR에서 운전 데이터의 저장 및 추출

이상일, 김명규, 백설희, 박미경, 박진섭, 이태구, 홍재식
국가핵융합연구소, KSTAR 운영사업단
e-mail: leesi@nfri.re.kr

Operational Data Storage and Retrieval for KSTAR Large Scale Experimental Machine

Sangil Lee, MK.Kim, S.Baek, MK.Park, T.G.Lee, J.S.Park, J.Hong
KSTAR Research Center, National Fusion Research Institute

요 약

KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)는 고성능 플라즈마 연구를 위한 대형 연구 실험 장치이다. 이러한 거대 장치에는 많은 시스템이 분산되어 연결되어 있으며 그 구조 역시 매우 복잡하여 시스템간의 인터페이스에 많은 제약과 어려움이 따른다. 이러한 복잡하고 다양한 시스템을 통합하고 여기서 발생하는 여러 종류의 데이터를 획득하기 위해서 KSTAR는 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)라는 오픈소스 기반의 분산 제어용 미들웨어를 구축하였고 이를 기반으로 KSTAR 통합 제어 시스템을 개발 하였다. 2008년 KSTAR 최초 플라즈마 실험 기간 동안의 운전을 통해 EPICS 미들웨어와 EPICS channel archiver를 이용하여 다양한 24시간 연속 운전 데이터를 안정적으로 저장하고 추출할 수 있음을 확인하였다. 논문에서는 시스템의 구축 방법 및 운전 결과에 대해 기술하고자 한다.

1. 서론

국가핵융합연구소(National Fusion Research Institute, NFRI)는 초전도 토카막 방식의 핵융합 실험 장치인 KSTAR(Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)를 1995년 착수하여 2007년 건설을 완공하고, 2008년 약 6개월간의 진공배기, 극저온 냉각, 초전도 코일 시험, 플라즈마 발생 등의 실험을 진행하여 최초 플라즈마 발생을 성공적으로 달성하였다. KSTAR 통합제어시스템은 극고진공, 극저온 상태를 유지하며 1억도 이상의 고온 플라즈마 실험을 안정적으로 수행하여야 하며, 다양한 하드웨어 플랫폼을 가지는 개별 장치 제어계의 통합 그리고 향 후 실험 목적에 따라 증설 될 시스템의 확장성 확보 등의 요구 사양들을 만족시키기 위하여 오픈소스 분산 제어용 미들웨어인 EPICS(Experimental Physics and Industrial Control System)을 도입하여 시스템을 구축하였다. EPICS는 Base와 Extension으로 구성된 소프트웨어 패키지를 제공하며 Base는 Ethernet UDP, TCP/IP기반의 통신라이브러리, 그 위에서의 CA(Channel Access) 프로토콜을 구현한 라이브러리, IOC(Input Output Controller)라이브러리, 프로세싱 Database를 구현한 라이브러리, Device support 라이브러리로 구성된다. Extension 패키지에는 CA를 통해 데이터를 획득하여 표시하는 여러 가지 툴들로 구성되어 있다.

2. KSTAR 전산 인프라 구성

KSTAR 통합 제어시스템은 일반적인 대규모 장치 제어 시스템(Large Scale Plant Control System)에서 요구되는 사항과 플라즈마 실험 및 제어라는 특수한 환경에서 요구되는 사항을 동시에 만족해야 한다. 두 상황에서 요구되는 사항을 열거하면 아래와 같다.

- 분산 제어(Distributed Control)
- 플랫폼의 다양성(Diversity)
- 시스템의 확장성(Scalability) 및 신뢰성(Reliability)
- 광대역(10kHz ~ 10MHz) 고정밀도(>16bit)
- 고성능, 실시간 MIMO(Multiple Input Multiple Output) Control이 가능한 플라즈마 제어계
- Low Latency, High Throughput Network
- 정밀 운전 동기화 및 이벤트 전달 체계

KSTAR의 지역 제어계는 플랫폼과 구성이 다양하며 각 지역 제어계의 특성에 따라 EPICS IOC가 구축되어 여러 지역에 분산되어 설치 되어있다. 통합 제어 시스템은 CA Gateway 서버를 통해서 Machine network에 연결된 모든 지역제어계와 Channel Access를 통해 통신한다. CA Gateway 서버는 모든 지역제어계의 EPICS IOC들과 가상연결(virtual connection)을 구성하여 모든 분산된 지역 제어계의 신호들을 하나의 제어 시스템 신호들로 취급 할 수 있도록 하여 단일화된 통합제어 인터페이스가 가능하도록 한다. 시스템 확장성에 있어서도 지역 제어계의 추가 증설시 EPICS IOC를 구성하여 Machine network에 연결하면 통합 제어시스템은 재기동 없이 새로운 지역제어계와 가상연결이 가능해진다. 또한 특정 지역제어계의 이상 발생 시에도 통합 제어시스템은 고장 범위의 파급효과 발생 없이 운전이 가능하다. KSTAR 장치의 플라즈마 방전 실험을 위해서는 시스템 간에 정밀한 운전 동기가 이루어

져야 한다. 이를 위해서 타이밍 시스템은 Timing network를 통해서 각 시스템을 정밀하게 동기화한다. 플라즈마 방전 실험 중 플라즈마 제어계는 MPS(Magenet Power Supply) 지역제어계와 고성능, 실시간 제어가 가능해야 하며 이를 위하여 전용의 Realtime network를 구성하여 공유 메모리 형식의 RFM(Reflective Memory) 통신을 한다. 플라즈마 방전 실험이 진행 되는 동안 진단 장치들로부터 대량의 데이터가 발생 되며 이런 순간적인 대량의 데이터로 발생하는 통신 부하를 막기 위해 Machine network와 Experimental network를 분리하여 전용 network를 구성하였다. 또한 플라즈마 방전 실험 중 이상 상태 발생으로부터 제어 계통을 보호하기 위하여 인터락 시스템 전용의 Interlock network을 구성하였다. 이렇게 목적별 독립된 네트워크를 구성하여 Low latency와 High thruput network를 구성하였다. 위의 명시된 요구 사항을 만족시키기 위하여 KSTAR의 전산 인프라는 그림1과 같은 구성을 갖는다.

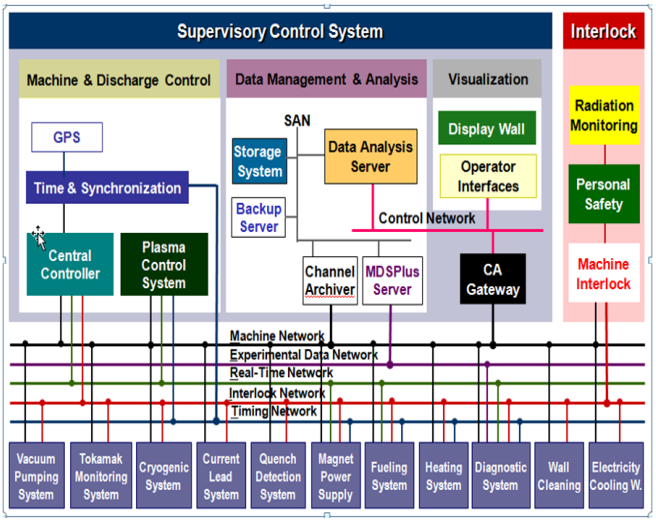

그림 1. KSTAR 제어 시스템 실험네트워크 구성

- **M**achine network: 각 지역제어계들과 주제어계를 연결하여 각 장치를 제어/감시 하며 해당 운전데이터를 Channel Archiver서버(운전 데이터 저장서버)를 통하여 주 스토리지에 저장하기 위한 네트워크
- **E**xperimental network(GigaEthernet): Post Shot Processing과 관련되어 대량의 진단 실험 데이터를 MDSPlus 서버(실험데이터 저장서버)를 통하여 주 스토리지에 저장하기 위한 네트워크
- **R**ealtime network: 플라즈마 제어 시스템(PCS)와 관련하여 고속의 플라즈마 정보 및 피드백 값을 다수 컴퓨터에서 클러스터 형태로 묶기 위한 Reflective Memory 통신 네트워크
- **I**nterlock network: KSTAR 토카막 장치는 여러 지역 제어계가 유기적으로 연동되며 개인 안전 연동시스템(PSI) 와 방사선 안전 관리시스템(RMS)를 포함한 비정상 상태에 대하여 계통을 보호하기 위한 PLC 전용 ControlNet 네트워크
- **T**iming network: 시각 동기화 시스템과 여러 분산 지역제어계를 연결하여 시각 정밀도를 가지고 유기적인 동기 운전을 하기위한 네트워크
- Channel Archiver 서버: Machine network를 통한 KSTAR 장치의 24시간 운전 데이터를 저장하기 위한 서버
- MDSPlus 서버: Experimental network를 통하여 shot 기반의 실험 데이터를 저장하는 서버
- Data Analysis 서버: 운전 및 실험 데이터를 추출 및 계산하는 서버(IDL, MATLAB, EFIT 사용)
- CA Gateway 서버: 분산된 지역 제어계와 통합 제어 시스템간의 virtual connection을 운용 및 관리하여 하나의 대규모 가상 신호 DB를 구축하기 위한 서버
- KSTAR Web 서버: KSTAR의 실험 정보를 웹으로 공유하기 위한 서버
- Backup 서버: KSTAR 운전, 실험 데이터의 중요성을 고려한 데이터 백업을 위한 서버

3. KSTAR 운전 데이터 저장 시스템

KSTAR에서 발생하는 데이터는 그 성격에 따라 두 종류로 분리된다. 하나는 토카막의 상태(온도, 응력, 변위, 자장, 전압, 전류) 및 진공용기, 저온용기의 상태(진공도, 압력)등과 같은 24시간 연속 운전되는 장치에서 발생하는 저속의 운전 데이터들이고 다른 하나는 플라즈마 방전 실험 중 진단 장치로부터 발생하는 대용량의 플라즈마 진단 데이터이다. 이런 대용량의 진단 데이터를 저장하기 위하여 MDSplus라는 특별한 Database를 사용한다. 본 논문에서는 운전 데이터 저장에 대한 부분만을 언급하기로 한다. KSTAR의 운전 데이터는 각 지역 제어계의 IOC로부터 획득하는 모니터링 데이터와 통합 제어시스템과 지역 제어시스템간의 원격 제어를 위한 제어 데이터로 구분 할 수 있다. 그림1에서와 같이 각 지역 제어계는 Machine network에 연결 되어 있으며 운전 DB서버는 서론에서 언급된 바와 같이 EPICS CA를 통하여 운전 데이터를 수집하여 공유파일 시스템을 통하여 주 스토리지 시스템에 저장한다.

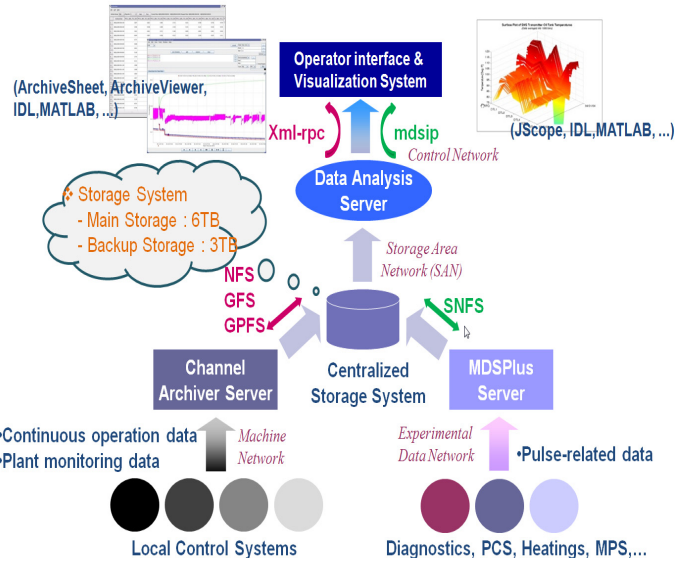

그림 2 데이터 저장 및 추출

3.1 구성

그림 2에서와 같이 운전 DB 서버는 분산된 지역제어 시스템의 EPICS IOC로 부터 신호 데이터를 획득하여 Channel Archiver의 환경설정에 따라 공유파일 시스템을 통하여 KSTAR 주 스토리지에 저장한다. 이렇게 중앙화

된 데이터는 공유파일 시스템을 통해 여러 서버에서 공유되는데 그림2에서 구성에 사용 가능한 공유파일 시스템은 표1에서 확인 할 수 있다.

표 1. 공유 파일시스템

공유파일 시스템	설 명	방 식
NFS	Network File System으로 Ethernet상에서 파일을 공유 유닉스/리눅스	Ethernet
GFS	Global File System으로 레드햇 리눅스 계열의 공유 파일 시스템, RedHat 리눅스	SAN
SNFS	StorNext File System으로 윈도우/유닉스/리눅스에서 공유 파일 시스템	SAN
GPFS	General Parallel File System으로 클러스터 환경의 공유 파일 시스템으로 표준 유닉스/리눅스에 사용가능	SAN / Ethernet

표1에 나타난 공유 파일 시스템은 파일 IO의 특성과 사용자가 사용하려는 데이터저장 어플리케이션의 특성에 따라 서로 다른 파일 IO성능을 나타낸다. 이런 공유 파일 시스템을 통하여 데이터 서비스 영역을 In-bound와 Out-bound로 구분 하였으며 In-bound 서비스로는 운전 DB서버에 획득한 데이터를 파일 쓰기만을 수행하며 Out-bound 서비스는 Data Analysis서버와 웹서버를 통해 파일 읽기 서비스만을 수행한다.

3.2 Channel Archiver

KSTAR 장치의 최초 플라즈마 실험기간 동안 Channel Archiver는 각 운전/실험 단계(냉각, 전류인가, Plasma 실험, 승온)별로 서로 다른 저장 정책을 가지고 데이터를 저장하였다. 각 지역제어 시스템의 EPICS IOC는 주어진 동작주기에 따라 데이터 프로세싱을 수행 하며 이때 발생된 이벤트 신호 및 주기적인 시간 간격에 따라 데이터를 획득하여 저장한다. 아래의 내용은 KSTAR의 지역 제어계 중 주요 시스템과 저장되는 운전 데이터 종류이다.

- TMS(토카막모니터링시스템): 토카막 초전도 자석의 상태를 모니터링, 온도, 응력, 변위, 자장 데이터
- VMS(진공모니터링시스템): 주장치의 진공용기, 저온용기의 진공상태 모니터링, 진공도, 압력 데이터
- CLS(전류인입시스템): TF, PF 초전도 자석으로 사용되는 전류 인입선의 상태 모니터링, 압력, 온도, 진공도 데이터
- HRS/HDS(헬륨공급분배시스템): 극저온 냉각을 위한 헬륨을 공급받아 초전도 버스라인 및 전류 인입 시스템에 헬륨을 분배, 압력, 온도 데이터
- QDS(퀜치검출시스템): 초전도 자석 계통을 보호하기 위한 퀜치 검출, 전압, 전류, 저항 데이터
- ECH/ICRH(가열장치시스템): 플라즈마 생성 조건을 만족시키기 위한 가열시스템, 장치의 상태 및 모드 데이터
- TSS(시각동기시스템): 플라즈마 방전 실험의 정밀한 동기운전을 위하여 각 시스템의 타이밍 보드에 설정되는 값
- DDS(진단DAQ시스템): 각 진단 DAQ의 설정 값
- ICS/CCS(주제어시스템): 운전제어와 관련된 데이터

3.3 ArchiveEngine 기동

ArchiveEngine은 Channel Archiver에서 데이터를 저장하기 위한 핵심 엔진이며 EPICS의 ChannelAccess client로 동작한다. ArchiveEngine은 서로 다른 여러 ChannelAccess server와 통신을 할 수 있으며 KSTAR에서는 시스템별 ArchiveEngine을 기동하여 사용하고 있다.

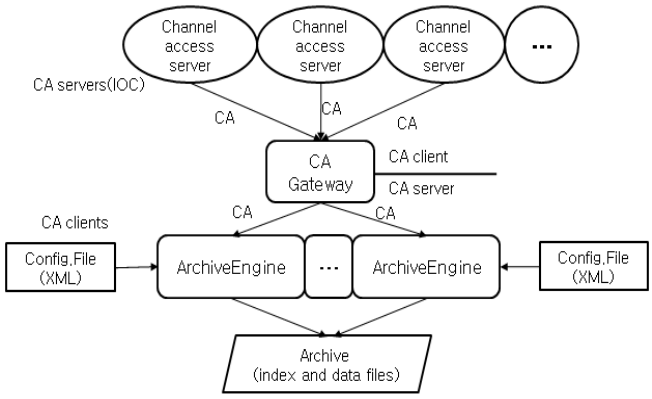

그림 3 KSTAR ArchiveEngine 구성도

USAGE: ArchiveEngine [options] <config-file> <index_file>
options:
-port <port> : TCP port
-description <text>
-log <filename>
-nocfg : disable online configuration

Example configuration file: archivelist.xml

```
<?xml version="1.0" encoding="UTF-8" standalone="no"?>
<!DOCTYPE engineconfig SYSTEM "engineconfig.dtd">
<engineconfig>
<buffer_reserve>20</buffer_reserve>
<file_size>60</file_size>
<get_threshold>20</get_threshold>
<ignored_future>1</ignored_future>
<max_repeat_count>0</max_repeat_count>
<write_period>30</write_period>
<group>
<name>TMS</name>
<channel><name>TMS_BUSPT_SPT_TCU001</name><period>30</period><scan/></channel>
<channel><name>TMS_BUSPT_SPT_TCU002</name><period>30</period><scan/></channel>
<channel><name>TMS_BUSPT_SPT_TCU003</name><period>30</period><scan/></channel>
</group>
</engineconfig>
```

그림 4 ArchiveEngine 설정파일 예

그림4의 설정 파일 예에서 tag에 대한 설명은 참고문헌 [4]를 참조한다. ArchiveEngine이 기동되면 ArchiveEngine은 인덱스 파일에 데이터 블록 정보 및 저장 된 시점의 시간 정보를 저장하고 데이터 파일에는 수집한 신호의 데이터 및 기타 정보를 저장한다.

3.4 ArchiveDataServer 데이터 추출

저장된 운전 데이터 추출은 EPICS CA 프로토콜을 사용하지 않고 XML-RPC 프로토콜을 사용한다. XML-RPC란 기존의 RPC(Remote Procedure Call)와 Transport Mechanism 프로토콜인 HTTP사이를 잇는 프로토콜로서, 다른 기종의 운영체제에서 HTTP를 통하여 다른 환경에서 수행되는 프로시저를 호출할 수 있도록 하는 규정과 그 구현을 말하며 전송은 HTTP를 사용하고 인코딩은 XML을 이용한다. 운전 데이터를 추출하여 디스플레이 하는 프로그램으로는 그림2의 상단에 표시되어 있는 Archiveviewer, Archivesheet, IDL 또는 MATLAB을 사용 할 수 있다.

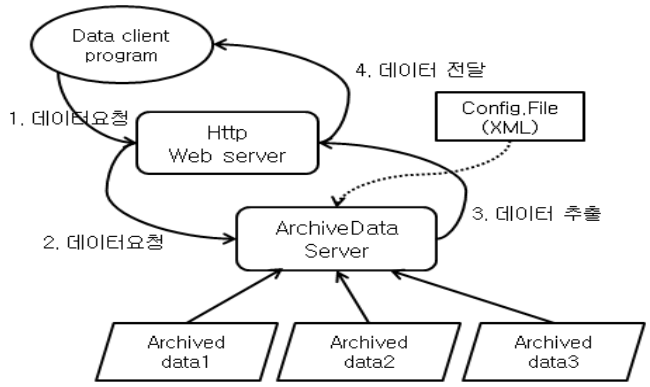

그림 5 Archived data 추출 데이터 흐름

그림 5에서처럼 각 OPI에서는 데이터 추출 Client 프로그램을 통해 데이터 정보를 요청하면 Out-bound 전용 서비스를 하는 DataAnalysis 서버는 요청받은 데이터에 대한 정보를 ArchiveDataServer를 통해서 데이터 파일을 추출하여 해당 OPI에 전송한다.

4. KSTAR 초기 운전 데이터 결과

최초 플라즈마 실험 기간(6개월) 동안 KSTAR에서 운전 중인 14개의 개별 장치들에서 발생한 운전 데이터는 표4와 같다. 또한 아래 그림은 KSTAR 실험 장치의 냉각 단계에서 극저온 냉각을 성공한 후 특정 센서에 대한 저장된 운전 데이터를 추출한 그래프이다.

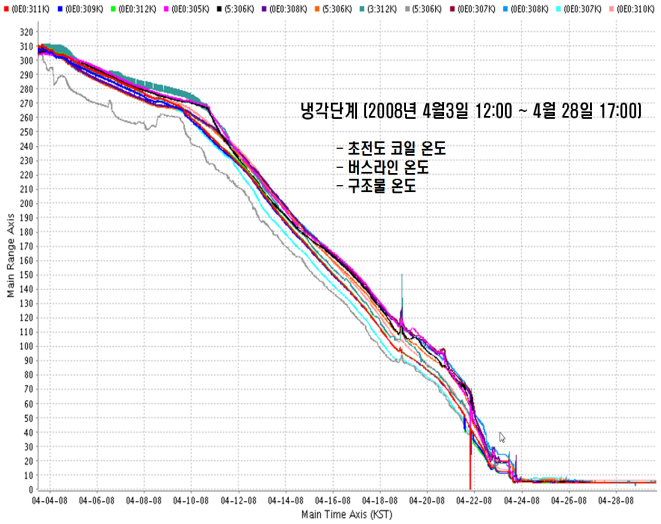

그림 6 KSTAR 운전 데이터 결과 예

표 4. 운전 데이터 서버를 통한 운전데이터 저장결과

시스템	PVs	실험단계별 archiving period			저장 GB
		저온냉각 전류인가	플라즈마	승온	
TMS	2281	event	1s	300s	910
VMS	570	event/60s	event/60s	300s	10.7
CLS	1456	event/60s	event/60s	300s	25
HDS	383	event/60s	event/60s	300s	2.28
HRS	167	event/1s	event/1s	300s	34
QDS	291	event/0.1s	event/0.1s	300s	35
ECH	141	event	event	300s	0.17
ICRH	20	event	event	300s	12.5
CCS	433	event	event	event	13
ICS	288				
FUEL	106	no	event	no	0.12
DDS	249	no	event	no	703
TSS	336	no	event	no	1.1
MPS (array)	38	no	0.1s	no	682
계	6759				1.73 TB

5. 결론

KSTAR와 같은 대형 실험 장치 또는 대형 플랜트에서 운전 데이터의 저장은 시스템의 제어 및 시스템의 이상 발생 시 그 원인을 추적하기 위해서도 매우 중요하다. 이러한 운전 데이터는 제어용 미들웨어와 직접적으로 연계되어 있는데, KSTAR에서 사용한 EPICS는 오픈 소스의 분산 제어용 미들웨어로 유닉스/리눅스, vxWorks/RTEMS 등의 플랫폼에서 제어 시스템을 구축하기 위한 뛰어난 Framework을 제공한다. 또한 EPICS Channel Archiver는 시스템에서 발생하는 운전 데이터를 유연하면서 간편하게 저장 관리 할 수 있으며 open source의 장점을 충분히 활용 할 수 있다. 향 후 KSTAR의 장시간 운전에 따라 증가할 데이터의 처리 및 데이터 공유 시스템의 확장 요구에 대응하기 위한 최적화된 공유 파일 시스템 구축과 시스템 redundancy, 데이터의 안정성 확보를 위한 운전 DB서버의 2중화 구성 및 영구 백업 시스템 구축 등을 수행 예정이다.

참고문헌

[1] Myungkyu Kim, I.K. Yu, Kukhee Kim, M.C. Kyum, M.Kwon, EPICS implementation for the KSTAR vacuum control system, Fusion Eng.Des.81 1823-1827 ,2006

[2] K.H. Kim, C.J. Ju, M.K. KIM, M.K. Park, J.W. Choi, M.C.Kyum, M. Kwon, The KSTAR integrated control system based on EPICS, Fusion Eng.Des.81 1829-1833 ,2006

[3] http://www.aps.anl.gov/epics

[4] http://ics-web.sns.ornl.gov/kasemir/archiver/manual.pdf