

전철 전력정보시스템에 관한 연구

A Study on the Power Information System for the Electric Railway

김 백¹ 문영현² 유현수³ 송경빈⁴ 조연옥⁵ 안충훈⁶
B. Kim Y. H. Moon H. S. Ryu K. B. Song Y. O. Cho C. H. Ahn

ABSTRACT

The conventional SCADA adopted for the electric railway has the mere function of controlling and monitoring the hardware itself. Lack of the functions necessary for the fault prevention and the system recovery requires the operators to depend on their intuition and experience. To make up for these shortcomings of the conventional SCADA, PIS(Power Information System) visually offers integrated information for the optimal operation of the power system by manipulating the raw data acquired from the SCADA. In this paper we have studied the variety of information and its feasibility that can be offered individually by PIS.

1. 서론

현재 전철용 전력시스템에 적용되는 SCADA는 단순히 하드웨어의 감시/제어 기능만을 가지고 운전되고 있다. 원격제어기능, 전기설비 감시, 원격 계측, 데이터 기록 등 많은 데이터가 주기적으로 시스템에 유입되어 시스템 운전원에게 정보를 제공하고 있으나 원시데이터 형태의 정보여서 안전운행에 필요한 사고 예방 및 시스템 복구기능은 운전원의 직관과 경험에 의존하고 있다. 소위 전력정보시스템(PIS)이라 함은 SCADA에서 수집된 데이터를 가공하여 운전원이 인식하기 쉽도록 시각적으로 처리된 통합 운영환경을 제공하고, 계통설비 상태판정, 변전소 상태 판정 등 전력 시스템 상황을 판정할 수 있는 기능을 제공하며, 하드웨어의 고장을 예방하고 고장 발생시 신속하게 시스템을 복구하는 사고 진단 복구기능을 제공하는 시스템을 말한다. PIS는 SCADA와는 달리 전력시스템의 제어를 수행하지는 않으며 SCADA와 병행으로 운전되게 된다. 따라서 PIS의 정체성에 대해서 이것이 단순히 종래 SCADA의 상위 버전 형태가 갖고 있어야 할 한 모듈로 본 다거나 또는 이와는 명백히 구별되는 별개의 전력 소프트웨어로 본다거나 하는 이견이 있을 수 있으나, '데이터'의 취득/제어에 중점을 둔 재래의 SCADA에 비해 '정보' 제공에 중점을 두고 있다는 점에서는 기존 SCADA와는 확연히 구분되는 점이 있다. 본 논문에서는 이러한 PIS가 포함하고 있어야 할 중요 기반 기술 및 개발 내용을 살펴보고 주요한 몇 가지 제공 정보의 구현 가능성에 대하여 살펴보고자 한다.

1. 한국철도대학 교수, 정회원
2. 연세대학교 교수, 비회원
3. 연세대학교 박사과정, 비회원
4. 계명대학교 교수, 비회원
5. 한국철도기술연구원 수석연구원, 정회원
6. (주)태협엔지니어링 이사, 비회원

2. PIS의 기반 기술 및 개발 내용

전철용 PIS의 개발에 필요한 기반 기술로는 다음 4가지를 선정하였다. 1) 전력 상황 판정 기술 2) 사고 진단/복구 지원 기술 3) 전력정보 통합 운영환경 개발 기술 4) 신뢰성 시험 및 시험 평가 기술로서 상기한 이들 4가지 기반 기술은 PIS가 기존 SCADA와 하드웨어적으로 연계되는 데 필요한 부분을 포함하고는 있으나 전철 전력계통 해석에 관한 부분이 주된 기술이라고 할 수 있다. 각각의 기반 기술이 포함하고 있어야 할 부분 기술을 살펴보면 우선, 전력 상황 판정 기술에는 RTU로부터 취득된 불량 데이터의 검출 알고리즘을 포함하여 변압기의 뱅크별 부하 상태 판정 알고리즘, 계통 SI(Security Index) 제공 알고리즘, 정류기 운전 상태 감시 알고리즘 등을 포함하며, 사고 진단/복구 지원 기술에는 계통사고 발생 시 최적 복구 절차 제공 알고리즘, 모의 사고 훈련 계획 등을 포함하게 된다. 또한 전력정보 통합 운영환경 개발 기술로는 단위 소프트웨어 연계 환경 설계, 통합 D/B환경 설계, 네트워크 기본 설계 등을 포함하며, 신뢰성 시험 및 시험 평가 기술에는 신뢰성/안전성 요구 조건 사양 개발, 하드웨어/소프트웨어 시험 평가 사양 개발 및 시스템 신뢰성 시험 평가 기술 개발 등을 포함하게 된다.

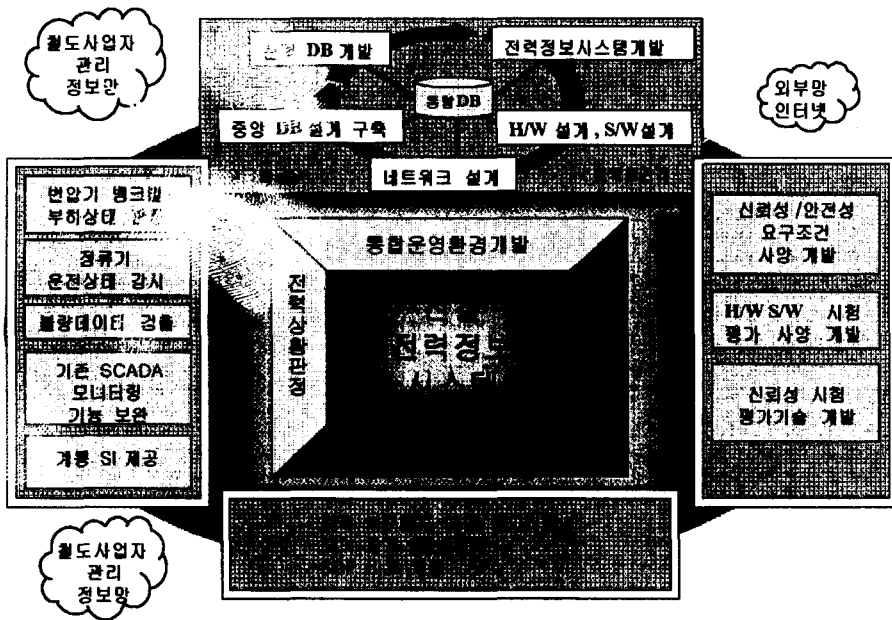


그림 1. PIS 기반 기술

3. PIS 구성 모듈 및 구현 가능성 검토

본 장에서는 각 기반 기술을 구성하고 있는 여러 모듈 중에서 대표적인 모듈을 소개하고 그 구현 가능성을 알고리즘 위주로 검토하고자 한다.

3.1 직류 조류 계산

직류 조류 계산 알고리즘은 전동차 운행 시 펜타그래프의 접촉 전압을 예측하여 전동차의 정상적인 운행 가능 여부를 판단케 하며, 또한 각 변전소의 분담 부하를 산출하여 변압기 뱅크별 부하 상태 판정, 불량 데이터 검출 기능 개발 및 사고진단/복구 지원 기능 개발에 적용되는 가장 기본적인 직류계통 관련 PIS 모듈이며 온라인 또는 오프라인 상황하에서 고속으로 계산을 수행하여야 한다. 전철 직류계통에서의 모선은 변전소의 DC 정극(+) 모선과 전동차의 운행에 따라 생성과 소멸을 하게되는 펜타그래프 접촉지점 모선이 있다. 한편 모선의 성격으로 볼 때 변전소 정극 모선

은 교류 조류 계산에서의 슬랙 모션 또는 전압조정 모션과 유사하며 펜타그래프 모션은 전동차의 운행 상태에 따라 양부의 정전력 부하 모션으로 볼 수 있다. 임의의 두 변전소 사이에 전동차 n 대가 운행 중일 때 n+1개의 전류와 n개의 펜타그래프 접촉 전압이 발생한다. 이 2n+1개의 전류, 전압을 상태 변수로 정의하여 다음과 같은 비선형 전력방정식을 세울 수 있다. 이 때 양쪽 변전소에서 공급하는 DC전원은 상수로 간주한다.

$$f(I, V) = 0 \tag{1}$$

위의 방정식은 반복법에 의해 해를 구할 수 있으며 샘플계통 테스트 결과 GS법보다는 NR법이 약조건 하에서도 계산 속도 면에서 유리함을 알 수 있었다. 이제 그림 2와 같은 경우를 예를 들어 직류 조류 계산을 수행해 보기로 한다.

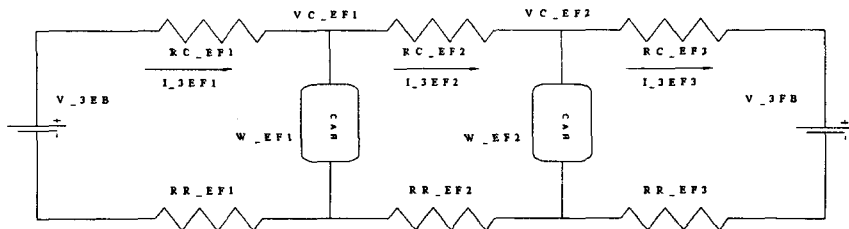


그림 2. 직류 조류 계산 예

전력방정식은

$$\begin{aligned} f1 &= I_{3EF1}(RC_{EF1}+RR_{EF1}) + VC_{EF1} - V_{3EB} = 0 \\ f2 &= I_{3EF2}(RC_{EF2}+RR_{EF2}) + VC_{EF2} - V_{EF1} = 0 \\ f3 &= I_{3EF3}(RC_{EF3}+RR_{EF3}) + VC_{EF3} - V_{EF2} = 0 \\ f4 &= (I_{3EF1}-I_{2EF2})*VC_{EF1} - W_{EF1} = 0 \\ f5 &= (I_{3EF2}-I_{2EF3})*VC_{EF2} - W_{EF2} = 0 \end{aligned} \tag{2}$$

과 같이 되고, 이 방정식을 NR법에 의해 풀면 다음과 같은 반복식이 된다.

$$\begin{bmatrix} I_{3EF1} \\ I_{3EF2} \\ I_{3EF3} \\ VC_{EF1} \\ VC_{EF2} \end{bmatrix}_{K+1} = \begin{bmatrix} I_{3EF1} \\ I_{3EF2} \\ I_{3EF3} \\ VC_{EF1} \\ VC_{EF2} \end{bmatrix}_K - J_f^{-1} \begin{bmatrix} f1 \\ f2 \\ f3 \\ f4 \\ f5 \end{bmatrix}_K \tag{3}$$

다음은 모의 데이터를 사용하여 위 알고리즘을 실행 했을 때 PIS에서 보여주는 결과이다.

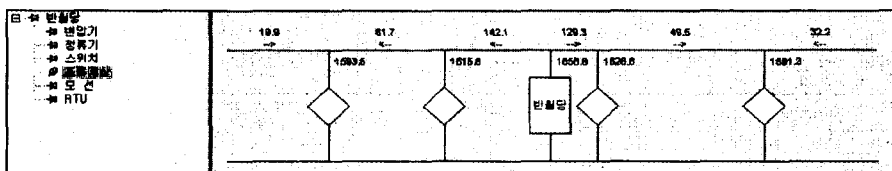


그림 3. 직류 조류 계산 결과 예

3.2 불량 데이터 검출

전철 전력계통의 상태는 측정계기가 설치되어 있는 각 측정지점으로부터 계측, 전송되어온 데이터로서 계산되어지며 전송되어 온 데이터가 양질일 때 높은 정확도와 신뢰도를 기대할 수 있다. 그러나 측정계기의 오차로 인한 부정확성 또는 데이터 전송 과정에서의 잡음으로 인하여 계통의 정확한 상태를 추정하는 것은 어려운 일이다. 따라서 상태추정 기능을 이용해 계기오차와 잡음 등으로 인하여 부정확성이 크다고 평가되는 불량 데이터를 검출하여 입력 데이터로부터 삭제시키는 알고리즘이 필요하다. 상태추정은 다음과 같이 식(4)에 의하여 구해질 수 있다.

$$z = h(x) + e \quad (4)$$

$h(x)$ 를 Taylor급수에 의해 전개를 하면 다음과 같고,

$$h(x) = h(x^k) + H(x^k)(x - x^k) + \dots \quad (5)$$

평가함수 $J(x)$ 는 다음의 식과 같이 유도된다.

$$J(x) = [z - h(x)]^T R^{-1} [z - h(x)] = \sum_{i=1}^m \frac{1}{\sigma_i^2} [z_i - h_i(x)]^2 \quad (6)$$

식(5)를 식(6)의 최적 조건에 대입하여 정리하면 다음의 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] &= H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)(x - x^k) \\ \Delta x^k = x - x^k &= [H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)]^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k = G^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 $\Delta z^k = z - h(x^k)$: 측정값의 오차벡터

$$G = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$$

다음은 상태 추정을 위한 단계별 알고리즘이다

- i) $k=0$ 으로 설정한다
- ii) Jacobi 행렬, 즉 $H(x^k)$ 를 계산한다
- iii) $\Delta z^k = z - h(x^k)$ 를 계산한다
- iv) $G(x^k) = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$ 를 계산한다
- v) 모든 측정값을 고려하여 새로운 상태 벡터 $x^{k+1} = x^k + G^{-1}H^T R^{-1} \Delta z^k$ 를 구한다
- vi) 만일 $\|x^{k+1} - x^k\| > \epsilon$ 이면 $k = k + 1$ 를 구하고 단계 ii)로 돌아간다
- vii) 만일 $\|x^{k+1} - x^k\| < \epsilon$ 이면 x^{k+1} 이 실제 정확한 계측의 값으로 볼 수 있다

한편 불량정보 유무는 χ^2 분포를 사용하여 판단할 수 있으며 정규화된 측정오차를 사용하여 다음의 평가함수를 계산한다.

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(Z_i - h(\bar{X}))^2}{\sigma_i^2} \quad (8)$$

상기 평가함수의 분포가 χ^2 분포를 취하므로 유의수준 α 에 따른 $J_{\max}(\alpha)$ 가 결정된다. 식 (8)에 의하여 계산된 J 값이 $J_{\max}(\alpha)$ 보다 크면 불량정보가 존재한다고 판정한다. 그렇지 않다면 불량정보가 존재하지 않는다고 간주한다. $J_{\max}(\alpha)$ 값은 $N \geq 30$ 일 경우는 J 의 분포가 정규분포를 따른다고 가정하고 값을 결정할 수 있으며 $N < 30$ 인 경우는 χ^2 분포 표에서 쉽게 값을 결정할 수 있다.

3.3 최적 복구 절차 제공

기존 SCADA의 자동운전모드 및 철도 사업자의 표준작업절차서(SOP)는 사고에 대해 일관성있는 복구절차를 제공하고는 있으나 이것이 최적의 절차일 수는 없다. PIS에서는 기존 방안의 분석을 통하여 요구사항을 도출하고 각각의 사고 형태에 따른 최적 복구 절차를 제공한다. 한전 수전변전소 또는 연락변전소의 장애 발생 시 개폐기의 절체 횟수, 모선 전압강하 및 운전 손실을 최소화하는 최적의 절체 방안을 PIS는 제시하여야 하며 제시된 방안은 표준작업절차서와 불일치 하는 경우가 있을 수 있다. 이때는 운영자에게 PIS 권고안과 SOP안을 동시에 제공하여 취사 선택할 수 있게한다.

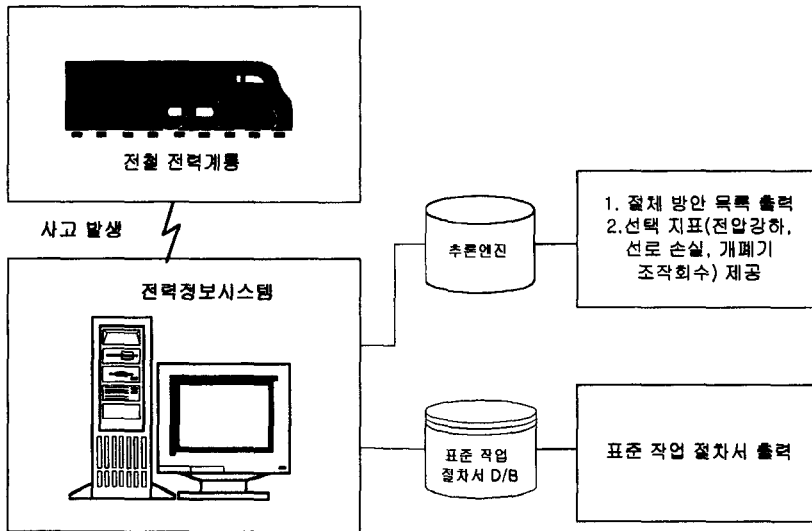


그림 4. 최적 복구 절차 제공

여기에서 선로사고 및 모선사고인 경우의 복구 절차 알고리즘을 예로 들면 다음과 같이 된다.

- i) 사고 변전소에 전력을 공급할 수 있는 선로/개폐기 조합계산
- ii) 계통 토폴로지 구성
- iii) 각 계통에 대해 교류 조류계산
- iv) N개의 조합에 대해 과정 ii) - iii) 반복 계산
- v) 최소 전압강하, 최소 선로 손실, 최소 개폐기 조작횟수 선택
- vi) 과정 v)에서 선택된 인자에 적절한 가중치를 곱하여 최적 절체 방안 선택

그림 5는 수전선로 사고시 PIS가 제공하는 절체방안을 나타낸 것으로 마킹된 Case 2의 SOP안이 최적 절체방안(Case 6)은 아님을 보여주고 있다.

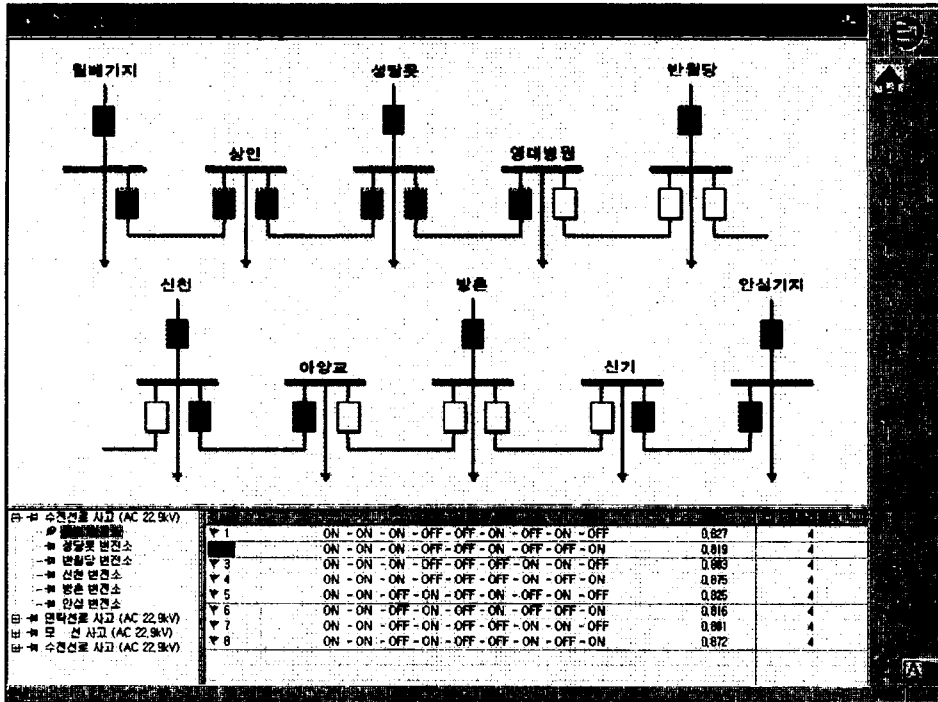


그림 5. 수전선로 사고 복구방안

3.4 통합 운영 환경

A) 네트워크 부분

전철 전력정보 시스템의 NOS(Network Operating System)로는 Windows NT, 데이터베이스의 저장과 운용을 담당하는 DBMS로는 Oracle사의 Oracle Workgroup Server 를 사용한다. 전력정보 시스템은 응용프로그램을 운용하는 클라이언트의 수가 적고 트랜잭션 또한 적게 일어나며 기존의 MS Windows가 제공하는 방대한 응용프로그램과의 OLE를 위하여, Unix 보다는 Windows NT기반의 클라이언트/서버(Client/Server)구조가 바람직하다. 따라서 전체 시스템의 네트워크는 Oracle Server에서 지원하는 네트워크 구조로 설계하였고 클라이언트의 운영체제는 Windows 98/Windows 2000을 사용하여 응용 프로그램의 활용성을 높이도록 한다.

B) 데이터 베이스와 단위 프로그램의 연계

DBMS로 오라클을 사용한다면 Visual C++과 같은 프로그래밍 언어를 사용하여 오라클 데이터베이스에서 접근하고 데이터를 처리하기 위한 SQL 문을 함께 사용할 수 있도록 하기 위하여 오라클에서 제공되는 Pre-Compiler, 즉 Pro*C 를 이용할 수 있다. 본 연구에서는 단위 프로그램 및 종합 DB간 연결을 위해 Pro*C를 사용한다.

C) 응용프로그램 환경

주화면은 해당 철도 시스템을 대상으로 하여 설계하며, 역간 연락상태 감시기능, 각 역의 전력부하 산출 및 전력 설비 상태 판정 기능, RTU에서 측정된 데이터 표시창 등이 구성 요소가 된다. 주화면에서 임의역을 선택하면 역 라인 다이어그램 화면으로 이동한다. 본 화면에서는 AC/DC 계통 설비의 상태를 파악할 수 있고, 관제점 설정, 수정, 삭제할 수 있다. 설정된 RTU 관제점에는 주기적으로 전력데이터 DB로부터 읽혀진 값이 표시된다. 역간이동 또는 상위 화면으로 이동이 가능하다. 응용프로그램 환경설계에는 화면 기본 설계, 사용자 인증 및 액세스 방법, 관제점의 추가 수정 삭제 방법 설계, 설비별 상태 제시 창 설계 및 DB와 연계방법 설계 등이 포함된다.

3.5 PIS의 신뢰성 시험 및 평가

A) 하드웨어 부분

PIS용 하드웨어의 신뢰성 시험은 IEC 605(장치의 신뢰성 시험) 규격에 따르는 것이 가장 적절한 공인 규격으로 판단되며 전력 정보 시스템을 설치할 메인 하드웨어 설계는 본 규격에 맞는 요구조건 H/W 사양을 검토한 후 결정되어야 한다. PIS에 적용되는 IEC 605규격은 세부적으로 다음과 같다.

IEC 605-1 : part 1 - 일반조건

IEC 605-2 : part 2 - 시험주기의 설계

IEC 605-3-1 : part 3-1 - 옥내 휴대용 장치 (낮은 수준의 모의)

IEC 605-3-2 : part 3-2 - 옥내 휴대용 장치 (높은 수준의 모의)

IEC 605-4 : part 4 - 신뢰성 결정 시험

B) 소프트웨어 부분

소프트웨어의 설계 및 신뢰성과 관련된 국제 규격은 매우 다양하며 이 중에서 PIS에 적용되는 규격은 대략적으로 기존 SCADA에 요구되는 것과 유사하다고 볼 수 있다. 관련되는 규격은 IEC 12119, IEC 12207, IEC TR 13233, IEC TR 15504-1, IEC TR 15504-2, IEC TR 15504-3, IEC TR 15504-4, IEC TR 15504-5, IEC TR 15504-6, IEEE 730, IEEE830, IEEE 829 및 IEEE 983 등인 것으로 조사되었다.

4. 결 론

기존의 전철용 전력SCADA가 단순히 데이터의 취득/제어에 중점을 두었다면 PIS는 이러한 기존SCADA의 취약 부분을 보완하여 전력 상황 판정 및 사고 진단/복구 지원 기능 등을 제공하게 된다. 본 논문에서는 전철 전력계통에 적용되는 PIS에서 필요로 하는 정보가 무엇인 지를 검토하였으며 이러한 정보 제공의 구현 가능성을 중요 정보별로 몇 가지 사례를 통하여 살펴본 결과, 실제로 가능함을 알 수 있었다. 또한 PIS의 개발과 관련된 기반 기술 내용도 검토되었다. 개발 과정에서 실제로 문제가 될 수 있는 것 들 로는 기존 SCADA의 관제점 부족 또는 설치 위치 부적절과 함께 기존 SCADA 와 PIS의 데이터 공유 연계부분이며 이는 기존의 SCADA 시스템 대부분에서 데이터 구조 및 DBMS가 공개되지 않고 있기 때문이다. 따라서, 기존 SCADA 와 PIS의 연계방안은 각각의 전철 전력SCADA마다 다르게 되며 이 점은 PIS의 범용화에 가장 큰 장애 사항이 될 것으로 판단된다.

본 연구는 산업기반기술 개발사업의 일환으로 산업자원부의 지원을 받아 시행되고 있습니다.
연구를 지원해 주신 ITEP 및 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. (주)광명제어(1998), "집중감시반 운영지침서"
2. J. Allan, et al.(1996), "Railway Technology and Environment", pp.127-55
3. C. Booth, et al.(1993), "Enhanced Power System Control and Management via Intelligent Substations", Proc. of IEE 2'nd International Conference on Advances in Power System Control, Operation and Management, VOL. 2, pp.542-547
4. JR교본연구회(1993), "원방감시제어장치"