

# 전철 전력정보시스템의 기능 및 구현 방법

## Functions and Feasible Methods of the PIS for the Electric Railway

김 백<sup>1</sup>    정 광 우<sup>2</sup>    문 영 현<sup>3</sup>    안 충 훈<sup>4</sup>  
B. Kim    K. W. Chung    Y. H. Moon    C. H. Ahn

---

### ABSTRACT

The conventional SCADA being used in the electric railway has the basic functions of remote controlling and system monitoring. Since the SCADA lacks the functions essential to the fault prevention and the system recovery, operators must depend on their intuition and experience to considerable extent. Visually integrated information offered by PIS contributes to the fast system recovery and the state judgment of the power system, and makes a novice be adapted for the operation easily. In this paper, we have studied the various functions and its feasibility that can be offered by PIS.

---

#### 1. 서 론

현재 전철전력시스템에 적용되고 있는 재래식 SCADA(원방 감시 시스템)는 원방제어/감시 기능만을 가지고 운전되고 있으며 많은 데이터가 주기적으로 SCADA에 유입되어 시스템 운전원에게 정보를 제공하고는 있으나 원시 데이터 형태에서 전력계통의 상태를 파악, 감시하는데는 숙련된 운용 기술과 직관을 요구하고 있다. 전력정보시스템(Power Information System), PIS는 기존 SCADA로부터 수집된 원시데이터를 가공하여 시각화된 정보를 제공함으로써 운전원으로 하여금 계통의 정확한 상태를 파악하고, 사고예방과 신속한 복구를 할 수 있도록 한다. PIS는 변전소 및 기타 계통 설비의 현재 상태를 판정하고, 하드웨어의 고장을 예방하며 고장 발생 시 신속하게 시스템을 복구하는 절차들을 제공하는 등 전력시스템 최적 운용을 위한 종합적인 정보관리 환경체제를 갖추고 있으며 운전원 친화적인 GUI에 기반을 둔 시스템이다. 따라서 계통에 대한 지식이 충분치 않은 비숙련자도 쉽게 운전 적응이 가능하며 결과적으로는 계통 운영에 불확실성을 제거할 수 있게 된다. PIS는 항시 SCADA와 병행으로 운전되게 되며 전력시스템의 제어 자체는 기존의 SCADA가 담당하게 된다. 따라서 PIS의 역할은 병행하게 되는 SCADA의 적용 분야에 전적으로 중속되게 된다. 기존 SCADA의 구성 요소들이 SCADA의 적용 분야와는 큰 연관없이 비슷한 구조를 보이는 데 반하여 PIS는 적용 분야에 따라 그 구성 요소가 확연히 틀려질 수 있다는 것이며 PIS가 어떤 구성 요소를 포함하고 있어야 앞서 언급한 소기의 목적을 달성할 수 있는 가는 PIS 설계에 매우 중요한 부분이고 이에 대한 구현 방법 또한 현실적으로 가능해야 한다. 본 연구에서는 '전철 전력계통에 적용되는 PIS'가 갖추고 있어야 할 주요 구성 요소를 도출하고 이 구성 요소에 대한 구현 방법에 대하여 검토하고자 한다.

---

1. 한국철도대학 교수, 정회원
2. 한국철도대학 교수, 정회원
3. 연세대학교 교수, 비회원
4. (주)태협엔지니어링 이사, 비회원

## 2. 전철용 PIS의 구성 요소 및 기본 설계

전철 전력시스템의 최적 운용을 위하여 PIS가 포함하고 있어야 할 기능들은 크게 다음 4가지로 분류될 수 있다. 이들은 1) 전력 상황 판정 기술 2) 사고 진단/복구 지원 기술 3) 전력정보 통합 운영환경 개발 기술 4) 신뢰성 시험 및 시험 평가 기술로서 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. 한편 시스템 자체의 기본설계도 다음과 같이 4가지 즉 1) 네트워크 기본 설계 2) 종합 DB환경 설계 3) 단위 S/W연계 환경 설계 4) H/W 사양 기본 설계로 구분할 수 있다. 네트워크 기본 설계에서 고려된 점은 PIS는 SCADA와 달리 응용프로그램을 운용하는 클라이언트의 수가 적고 트랜잭션 또한 SCADA에 비해 적게 일어나므로 Unix를 기반으로 하지 않고 Windows NT 기반의 클라이언트/서버 구조로도 적절하다는 것이며, 종합 DB환경 설계시 증점을 두어야 할 부분은 개발의 용이성과 확장성 및 타 시스템에로의 이식성 등을 들 수 있다. 이런 관점에서 볼 때 현재로서는 Oracle외의 다른 대안은 마땅치 않다고 판단된다. 한편 DB와 단위 구성 요소 프로그램간의 연계에는 Visual C++과 같은 프로그래밍 언어를 사용하여 Oracle DB에 접근하고 데이터를 처리하기 위한 SQL 문을 함께 사용할 수 있도록 하기 위하여 Oracle에서 제공되는 Pre-Compiler를 이용할 수도 있다. 본 연구에서는 단위 프로그램 및 종합 DB간 연결을 위해 Pro\*C를 사용하였다.

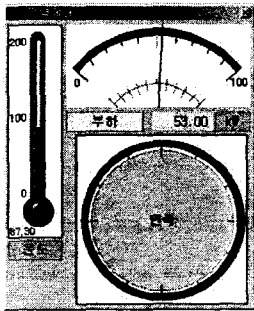
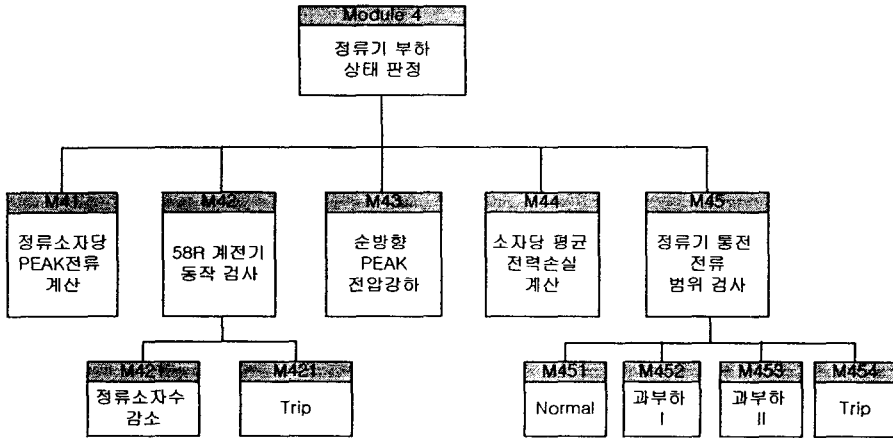
## 3. 전철용 PIS 주요 구성 요소 및 구현 방법 검토

### 3.1 정류기 운전상태 감시

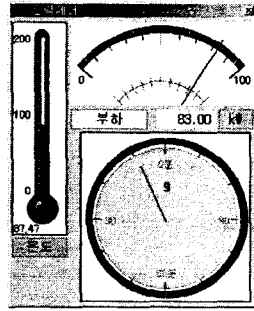
정류소자의 열적 안정은 정류기 운전에 필수적인 요인이고, 정류기 운전상태 감시 기능은 이러한 반도체 정류소자 접합부 온도의 실시간 모니터링이 주가 되며 이를 이용하여 정류기의 안전 지수를 제공하고 과부하 시 등의 비정상적 상황에서 정류기를 안정되게 운전하는 도구로서의 역할을 제공한다. 반도체 소자의 접합부 온도 측정은 실제 접합부에서의 측정은 불가능하며 소자 제작자가 제공하는 관련 특성으로부터 온도를 예측하게 된다. 따라서 소자의 특성은 전력정보시스템D/B에 미리 구축되어 있어야 하며, SCADA로부터 취득된 직류 부하 전류를 근거로 접합부 온도를 예측하게 된다. 일반적으로 정류설비에는 반도체 보호용 휴즈의 소손을 감시하는 보호계전기(58R), 온도계전기(26R) 등이 있으며 이들 동작신호가 SCADA를 통하여 본 프로그램의 입력으로 사용된다. 한편 출력은 접합부 온도 및 이에 따른 정류기의 SI 그리고 과부하시의 잔여 운전 가능 시간과 계전기 동작에 따른 정보로 구성된다. 표 1은 본 프로그램의 입출력 절차 그림 1은 프로그램 구조 및 실행 결과를 보여주고 있다.

표 1. 정류기 운전상태 감시 프로그램 입출력 절차

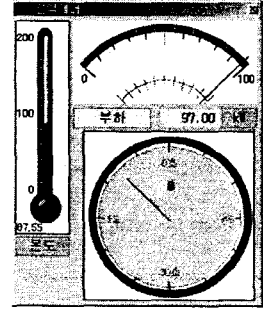
입력	처리	출력
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 보호계전기(58R, 26R) 동작상태</li> <li>· 정류소자 특성치</li> <li>· 정류기 분담 직류 전류</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 정류소자당 Peak전류 계산</li> <li>· 순방향 Peak전압강하 계산</li> <li>· 소자당 평균 전력손실 계산</li> <li>· 과부하 운전조건 비교에 의한 운전상태 판단</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 정류기 접합부 온도</li> <li>· 정류기 Security Index</li> <li>· 과부하 운전시 잔여 운전 가능 시간</li> </ul>



(a) Normal



(b) 과부하 I



(c) 과부하 II

그림 1. 정류기 운전상태 감시 프로그램 구조 및 실행 결과

### 3.2 불량 데이터 검출

전철 전력계통의 상태는 측정계가 설치되어 있는 각 측정지점으로부터 계측, 전송되어온 데이터로서 계산되어지며 전송되어 온 데이터가 양질일 때 높은 정확도와 신뢰도를 기대할 수 있다. 그러나 측정계의 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. 상태추정의 과정을 간략히 소개하면 다음과 같다.

$$z = h(x) + e \quad (1)$$

여기서  $z$ 는 측정벡터,  $x$ 는 상태벡터 그리고  $e$ 는 오차벡터이며  $E[e] = 0$ ,  $E[ee^T] = R$ 이라 하면, 측정치와 고장 발생 확률을 적용한 평균 상태추정오차인 평가함수  $J(x)$ 는 다음의 식(2)와 같이 유도된다.

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

상태추정오차인 평가함수  $J(x)$ 를 최소화하기 위한 최적 조건은 다음의 식(3)과 같다.

$$\frac{\partial J(x)}{\partial x} = 2H^T(x)R^{-1}[z - h(x)] = 0 \quad (3)$$

여기서  $H(x) = \frac{\partial h(x)}{\partial x}$  :

고장 발생시 측정 가능 세트에 해당하는 Jacobi 행렬  $h(x)$ 를 Taylor급수에 의해 전개를 하면 다음과 같고,

$$h(x) = h(x^k) + H(x^k)(x - x^k) + \dots \quad (4)$$

식(4)를 (3)에 대입하여 정리하면 다음의 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} H^T(x^k)R^{-1}[z - h(x^k)] &= H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)(x - x^k) \\ \Delta x^k = x - x^k &= [H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)]^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k = G^{-1}H^T(x^k)R^{-1}\Delta z^k \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $\Delta z^k = z - h(x^k)$  : 측정값의 오차벡터,  $G = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$

이제 상태추정을 위한 알고리즘은 다음과 같다.

- (a) 측정기로부터 Data를 입력받는다.
- (b) 상태벡터를 초기화시킨다.
- (c) 알고리즘의 수렴 판정을 위하여  $\epsilon$ (stopping criterion)을 설정한다.
- (d)  $k = 0$ 으로 설정한다.
- (e) Jacobian 행렬, 즉  $H(x^k)$ 를 계산한다.
- (f)  $\Delta z^k = z - h(x^k)$ 를 계산한다.
- (g)  $G(x^k) = H^T(x^k)R^{-1}H(x^k)$ 를 계산한다.
- (h) 모든 측정값을 고려하여 새로운 상태벡터  $x^{k+1} = x^k + G^{-1}H^T R^{-1}\Delta z^k$ 를 구한다.
- (i) 만일  $\|x^{k+1} - x^k\| > \epsilon$ 이면  $k = k + 1$ 을 하고 단계(e)로 돌아간다.
- (j) 만일  $\|x^{k+1} - x^k\| < \epsilon$ 이면 새로 구한 상태벡터  $x^{k+1}$ 이 실제 정확한 계측값이라 할 수 있다.

한편 불량정보 유무는  $\chi^2$  분포를 사용하여 판단할 수 있으며 정규화된 측정오차를 사용하여 다음의 평가함수를 계산한다

$$J = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N \frac{(Z_i - h(\bar{X}))^2}{\sigma_i^2} \quad (6)$$

상기 평가함수의 분포가  $\chi^2$  분포를 취하므로 유의수준  $\alpha$ 에 따른  $J_{\max}(\alpha)$ 가 결정된다. 식 (6)에 의하여 계산된 J값이  $J_{\max}(\alpha)$ 보다 크면 불량정보가 존재한다고 판정한다. 그렇지 않다면 불량정보가 존재하지 않는다고 간주한다.  $J_{\max}(\alpha)$  값은  $N \geq 30$ 일 경우는 J의 분포가 정규분포를 따른다고 가정하고 값을 결정할 수 있으며  $N < 30$ 인 경우는  $\chi^2$ 분포 표에서 쉽게 값을 결정할 수 있다. 표 2는 본 프로그램의 입출력 절차, 그림 2는 프로그램 구조 및 실행결과를 보여주고 있다.

표 2. 불량 데이터 검출 프로그램 입출력 절차

<ul style="list-style-type: none"> <li>· 측정 계기로부터 유효 전력값</li> <li>· 측정 계기로부터 전압값</li> <li>· 측정 계기로부터 전류값</li> <li>· 차단기 정보</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 상태 추정을 위한 상태변수 선택</li> <li>· 상태 추정 알고리즘 수행</li> <li>· <math>\chi^2</math> 분포에 의한 불량정보 검출알고리즘 수행</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 측정점 전력값</li> <li>· 측정점 전압값</li> <li>· 측정점 전류값</li> <li>· 측정점 오차율</li> </ul>
---	---	--

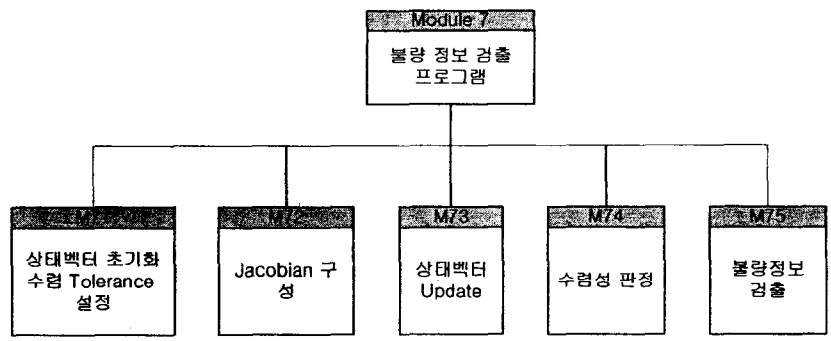
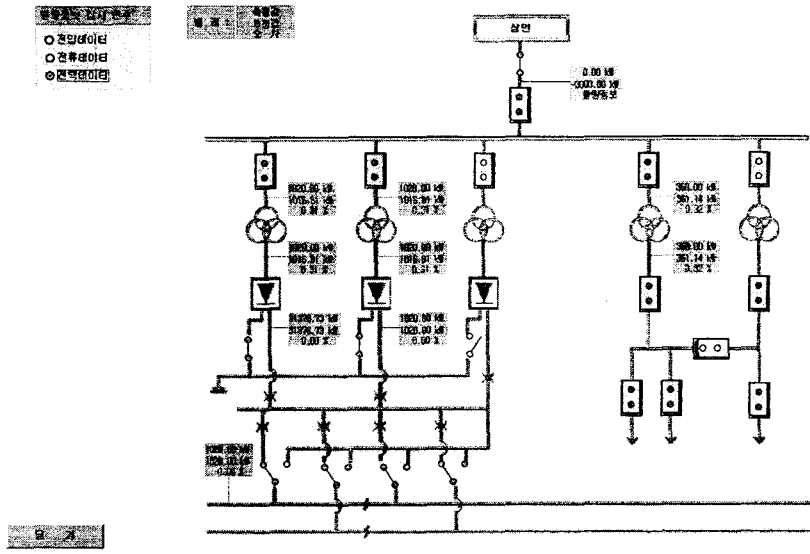


그림 2. 불량 데이터 검출 프로그램 구조 및 실행 결과

### 3.3 직류 조류계산

직류 조류계산 프로그램은 전동차 운행 시 팬타그래프의 접촉전압과 선로전류를 계산하여 전동차의 운행 상태를 감시하고, 정상적인 운행 가능여부를 판단하는 기능을 한다. 또한 각 변전소의 분담 부하를 산출하여 변압기 뱅크별 부하상태 판정, 불량 데이터 검출 및 사고진단/복구 지원에 적용되는 가장 기본적인 직류계통 관련 PIS 프로그램이다. 본 모듈은 온라인 또는 오프라인 상황에서 고속계산이 요구되어진다. 일반적인 전력계통(한전 교류계통)에서의 조류계산과 마찬가지로 조류계산의 결과로서는 모선에서의 전압(교류에서는 위상각 포함)을 구해낸다. 단지 전철 직류계통에서의 모선이라 함은 항상 존재한다고 볼 수 있는 변전소의 정극(+)모선과 함께 전동차의 운행에 따라 생성과 소멸을 하게되는 모선이 있을 수 있는데 이는 전동차의 팬타그래프와 전차선에 의해서 생겨나는 모선을 지칭한다. 한편 모선의 성격으로 볼 때 변전소 정극 모선은 교류 조류계산에서의 슬랙 모선 또는 전압조정모선 유사하며 팬타그래프모선은 전동차의 운행상태에 따라 바뀌는 양·부의 정전력 부하모선으로 볼 수 있다.

임의의 두 변전소 사이에 전동차 n대가 운행 중일 때 n+1개의 전류와 n개의 팬타그래프 접촉전압이 발생한다. 이 2n+1개의 전류,전압을 상태 변수로 정의하여 다음과 같은 비선형 전력방정식을 세울 수 있다. 이 때 양쪽 변전소에서 공급하는 DC전원은 상수로 간주한다.

$$f(I, y) = 0 \quad (7)$$

위의 방정식은 반복법에 의해 해를 구할 수 있으며 샘플계통 테스트 결과 GS법보다는 NR법이 약조건 하에서도 계산 속도 면에서 유리함을 알 수 있었다. 표 3은 본 프로그램의 입출력 절차, 그림 3은 프로그램 구조 및 실행결과를 보여주고 있다.

표 3. 직류 조류계산 프로그램 입출력 절차

입력	처리	출력
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 열차 위치·수 정보</li> <li>· 직류 정극모선 전압</li> <li>· 전차선 직류지향</li> <li>· 전동차 부하</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 전동차 n대 운행 중일 때</li> <li>· n+1개 mesh로 이루어진 네트워크 발생</li> <li>· 전력방정식 구성</li> <li>· NR법에 의한 해 찾기</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 전동차 팬타그래프 접촉전압</li> <li>· 선로 전류</li> <li>· 변전소 분담 전류</li> </ul>

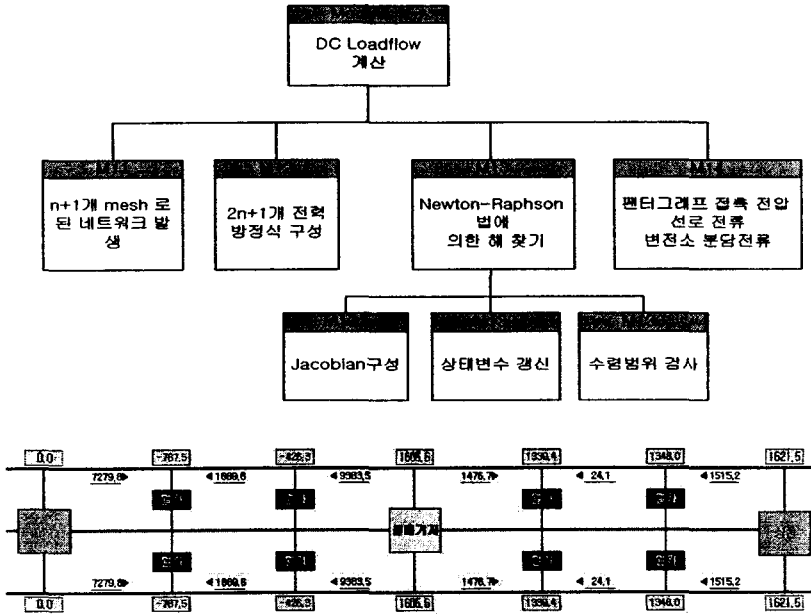


그림 3. 직류 조류계산 프로그램 구조 및 실행 결과

### 3.4 사고복구 시스템

기존 SCADA의 자동운전모드 및 철도 사업자의 표준작업절차서(SOP)는 사고에 대해 일관성 있는 복구절차를 제공하고는 있으나 이것이 최적의 절차일 수는 없다. PIS에서는 기존 방안의 분석을 통하여 요구사항을 도출하고 각각의 사고 형태에 따른 최적 복구 절차를 제공한다. 한전 수전 변전소 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.

사고복구 전문가 시스템은 계통 재구성기능과 사고 복구기능 두 가지를 수행한다. 첫째 정상운전시의 계통 재구성방안은 운전부하에 따른 계통손실 시뮬레이션에 따라 달라지게 된다. 따라서 계통 재구성방안을 제시하는 경우의 입력은 계통 Topology와 함께 각 변전소들의 평균부하가 된다. 계통 Topology입력은 전력정보시스템의 D/B로부터, 그리고 변전소 평균부하는 직류 조류계산을 수행하여 얻는다. 둘째 사고 발생시의 복구방안을 제시하는 경우는 입력으로 계통 Topology는 전력정보시스템의 D/B로부터, 그리고 부하는 장애발생 시점의 각 변전소 부하가 되므로 이 경우는 SCADA로부터 계통 장애 발생 직전의 부하데이터를 읽어들인다. 표 4는 본 프로그램의 입출력 절차, 그림 4는 프로그램 구조 및 실행결과를 보여주고 있다.

표 4. 사고복구 프로그램 입출력 절차

입력	처리	출력
<ul style="list-style-type: none"> <li>· 계통 Topology</li> <li>· DC Loadflow 데이터</li> <li>· AC Loadflow 데이터</li> <li>· 사고 유형</li> <li>· 사고 위치</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 변전소 분담 부하 계산(DC Loadflow)</li> <li>· 계통 Topology에 의한 계통 분할의 경우의 수 계산</li> <li>· 각 계통에 대한 조류계산(AC Loadflow)</li> <li>· 선로 손실, 개폐기 조작횟수 개폐기 상태 계산</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 선로손실</li> <li>· 전압강하</li> <li>· 개폐기 상태</li> <li>· 개폐기 조작횟수</li> </ul>

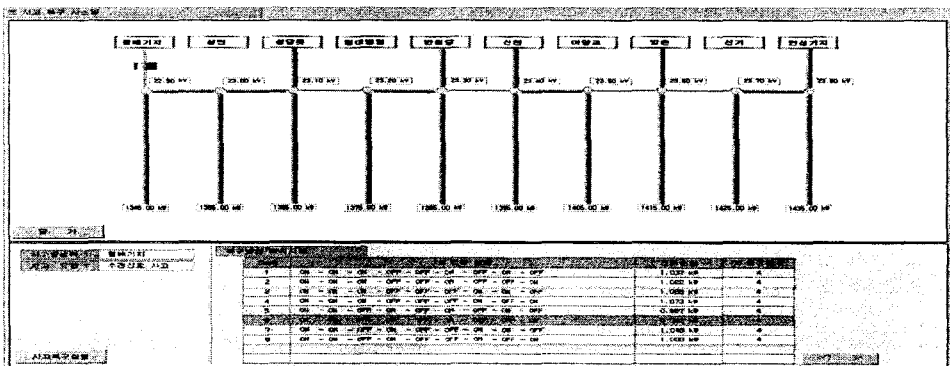
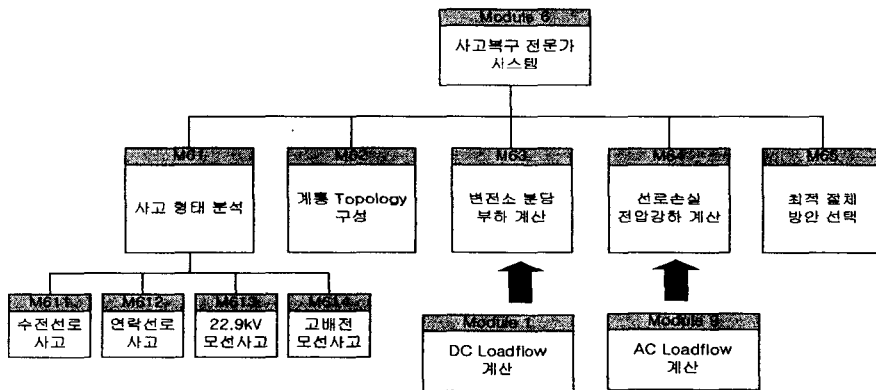


그림 4. 사고복구 프로그램 구조 및 실행 결과

#### 4. 결 론

PIS는 기존SCADA의 취약 부분을 보완하여 전력 상황 판정 및 사고 진단/복구 지원 기능 등을 제공하게 된다. 기존 SCADA의 구성 요소들이 SCADA의 적용 분야와는 큰 연관없이 비슷한 구조를 보이는 데 반하여 PIS는 적용 분야에 따라 그 구성 요소가 확연히 틀려질 수 있다. 본 연구에서는 '전철 전력계통에 적용되는 PIS'가 갖추고 있어야 할 주요 구성 요소를 도출하고 이 구성 요소에 대하여 구체적으로 처리 알고리즘, 입출력 절차, 프로그램 작성 및 이의 실행을 통하여 '전철 전력계통에 적용되는 PIS'의 기능 및 구현방법에 대해 검토하였으며 SCADA와의 병렬 운용에 이상이 없음을 확인할 수 있었다. 이후 이 분야의 연구 과제로는 기존 SCADA의 관제점 부족에 따른 데이터 손실 처리 방안과 기존 SCADA 와 PIS의 데이터 공유 연계부분에 대한 안전성 및 신뢰성 확보 분야가 될 것으로 판단된다.

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

#### 참고문헌

1. (주)광명제어(1998), “집중감시반 운영지침서”
2. 김백외 5(2001), “전철 전력정보시스템에 관한 연구”, 한국철도학회, 2001년도 춘계학술대회 논문집, pp. 359-365
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”