

한국형 EMS의 계통해석 프로그램 개발 현황

*이육화¹, 윤상윤¹, 조윤성¹, 이진¹, 최종웅¹, 허성일², 김선구², 이효상², 김홍래³
¹LS산전(주), ²한국전력거래소, ³soonchunhyang 대학교

A Review on the development status of Korean EMS Network Applications Software

*W.-H. Lee¹, S.-Y. Yun¹, Y.-S. Cho¹, J. Lee¹, J.-W. Choe¹, S.-I. Hur², S.-K. Kim², H-S. Lee², H-R, Kim³
¹LS Industrial Systems, ²Korea Power Exchange, ³Soonchunhyang University

Abstract - 본 논문은 전력IT 국책과제로 진행되는 EMS(Energy Management System) Network Applications(NA)의 개발로써 향후 개발될 한국형 EMS시스템에 탑재될 응용 프로그램 DB, 토폴로지 프로세서, 상태추정 등 실시간 계통해석에서 사용되는 프로그램들의 개발 현황을 중심으로 기술되어 있다.

1. 서 론

EMS Network Applications(NA)에는 상태추정, 안전도해석, 조류해석, 상정해석 등 다양한 프로그램들이 존재하며 계통의 정상운영 시나 휴전작업 및 고장을 상정하여 실시간 취득 자료를 기본으로 계통분석을 실행하는 실시간 환경(realtime environments)과 또는 저장된 자료를 추출하여 계통분석을 실행하는 스터디 환경(study environments), 그리고 급전원 모의 운영시스템 등에서 수행된다. 본 연구 범위는 EMS 실시간 환경과 스터디 환경에서 운전되는 Network Applications을 개발하는 것이다. Baseline EMS시스템에는 응용 프로그램 DB, 토폴로지 프로세서, 상태추정 등이 개발 구축된다.

1.1 실시간 환경에서 EMS Network Applications

실시간 환경 하에서 수행되는 계통해석 기능으로, 상태추정(SE : State Estimator), 상정고장해석(CA : Contingency Analysis), 전압계획(VVD : Voltage Var Dispatch), 주요 송전선에 대한 송전가능용량계산(ATC : Available Transfer Capacity) 등이 존재한다. 그림 1에서 SCADA를 기반으로 하는 EMS Network Applications 개념도를 보이고 있으며 실시간 환경 및 스터디 환경을 포함하고 있다. 실시간 환경에서 응용 프로그램의 실행은 일반적으로 5분에서 20분사이의 주기적 실행방법이 있고 이 사이에 급전원은 EMS에 의하여 계산된 리미트(limits) 이내의 최적 운전점을 선정할 수 있다. 또다른 실행 방법은 급전원의 임의적 개입 및 주요 차단기 개방 등이 발생된 경우로 일반적으로 실행에 있어 가장 우선순위가 높다. 한편 이미 기존의 실행 명령을 받아 실행하는 중간에 새로운 기동 명령을 받는 경우에는 급전원 선정된 우선 순위에 따라 신규 실행 명령을 수행하기도 회피하기도 한다. 이러한 다양한 실행 조건은 급전원의 경험적 능력에 근거한 방법과 더불어 매우 중요한 요소들이다. 상태추정은 실시간 환경에서 첫 번째로 수행되는 프로그램으로 네트워크의 토폴로지(network topology) 결정과 계통 상태(state variable)을 결정하는 요소로 구성되어 있다. 네트워크 토폴로지는 SCADA의 상태 정보(Status)를 통하여 네트워크의 전기적 연결도, 계통탈락설비요소, 고압계통 등에 대한 정보를 생성한다. 이러한 토폴로지의 정보는 이후 모든 실시간 계통해석의 기본이 되므로 매우 중요하며 오류를 방지하는 것이 매우 중요하다. 또한 발전소나 변전소에서 취득된 데이터는 오차를 내재하고 있으므로 취득 데이터를 보정하고, 미취득 자료를 추정하여 계통해석 기능에 가장 정확한 정보를 제공하는 상태추정 기능이 있다. 현재의 계통 상태가 결정이 되면 전력계통 설비(주로 송전선)의 고장을 상정하고 전력계통 운용상태를 분석하여 상정고장 중 계통운용에 영향을 미치는 순위를 설정하고 계통을 분석하여 상정고장시의 전력계통 상태를 계통운영에 반영하는 상정사고해석 등을 통하여 현재 계통 상태에서의 잠재적 위해 요소(harmful contingency-related problems)를 식별한다. 또한 현재 계통 상태에서 목표전압을 유지하면서 송전손실을 최소화하는 조상설비 운용계획(발전기 무효전력 계획, 변압기 탭, 조상설비 탭 선정)에 대한 정보를 수립하는 전압 계획 구성할 수 있으며 주요 송전선의 송전가능용량을 산정하고 송전망 이용정보시스템을 통하여 송전망 이용가능 용량을 실시간 정보로 공시할 수 있는 송전가능용량계산등을 수행한다.

1.2 스터디 환경에서 EMS Network Applications

스터디 환경 하에서 수행되는 계통해석 기능으로, 조류해석(PF : Power Flow), 고장회로 해석(SCA : Short Circuit Analysis), 안전도

해석 등이 존재한다. 각 스터디 계통해석 기능의 실행은 실시간 환경과 분리된 환경에서 수행되는데, 일반적으로 스터디 환경에서는 실시간 환경에서 수립된 상태 추정 결과나 이전의 스터디에서 수행된 결과 등 저장된 케이스(saved cases)를 불러들여 여러 명의 급전원이 동시에 수행할 수 있다. 상태추정의 스터디 버전도 구축되어 과거 저장된 측정데이터로부터 전력계통을 재구축하거나 불량 데이터가 포함된 입력데이터로부터의 영향을 추정할 수 있다. 상정사고 해석의 스터디 버전도 구축되어 실시간 환경과 동일한 상정해석을 수행할 수 있다. 또한 취득 자료를 기본으로 모션전압, 선로 조류, 위상각 등을 계산하여 선로 과부하, 모션전압 유지상태 등을 분석하는 급전원 조류해석 기능을 포함한다. 전력계통의 단락고장 발생시 단락전류를 산정하는 고장해석을 수행하여 실계통에서 발생 가능한 다양한 사고의 영향을 예측하며 기 설치된 차단기의 차단 용량을 검토할 수 있는 고장해석 기능도 있다.그림 1은 개념도이다.

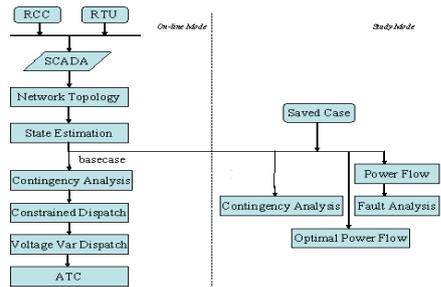


그림 1. EMS Network Applications 개념도

2. K-EMS Network Applications

2.1 Application Common Data Base

EMS의 Application Program은 TP(Topology Processor), SE(State Estimator), DPF(Dispatcher Power Flow), CA(Contingency Analysis) 등의 10여종이며 이들 각각의 입출력을 위한 전용의 DB 구조로는 자원의 낭비가 심할 수 있으며, DB의 수정 변경시의 일관성 또한 문제가 될 수 있다. 또한 EMS NA 프로그램은 주어진 주기내에서 반복하여 시퀀셜하게 여러 가지 소프트웨어가 실행되어야 하므로 매우 짧은 데이터 입출력 시간을 요구한다. 따라서 모든 Application Software가 공통으로 사용할 수 있으며 매우 짧은 수행시간에 데이터를 읽고 쓰는 것이 가능한 Database 구조의 설계가 반드시 요구된다. 본 연구에서 개발한 Application Common Model(ACM) DB는 어플리케이션 연산 및 화면출력을 위해 크게 계층적(Hierarchy)[그림 2] 구조와 비 계층적 구조의 두 부분으로 구성하였다. 계층적 구조는 포함 및 소속의 1:n 관계를 가지고 있는 것으로 전력회사부터 각 계통설비까지의 정보가 이에 해당한다. 또한 비 계층적 구조는 1:1 관계 또는 독립적 정보들로 해석 옵션, 측정 정보, 알람 기준 등이 이에 해당한다. 계층적 구조에 포함되는 정보들은 또한 정적(Static)인 정보와 동적(Dynamic)인 테이블로 나뉘어지며 동적인 정보는 각 어플리케이션 별로 테이블을 따로 가지는 형태이며 병렬(Parallel) 테이블 구조로 그룹화 하여 입출력 자원의 낭비를 줄일 수 있도록 하였다. 모든 테이블간의 연결은 직접(Direct) 및 간접(Indirect) 인덱스 코드를 사용하여 데이터로의 빠른 접근이 가능하도록 구성하였다.

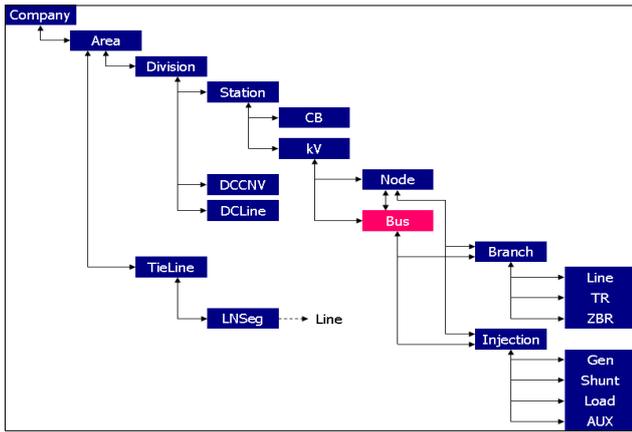


그림 2. Application Common Model(ACM) 계층 구조

2.2 토폴로지 프로세서 개발

토폴로지 프로세서(Topology Processor)는 스카다로부터 차단기 및 단로기의 On/Off 정보를 받아 현재의 네트워크 연결 상태를 결정해주는 프로그램을 개발하는 것을 목적으로 한다. 토폴로지 프로세서는 NA 데이터베이스에서 배스 데이터 및 차단기 및 단로기 정보를 쿼리할 수 있는 기능이 있어야 한다. 스위칭 정보는 스카다, 급전원의 수동 및 계획 입력으로부터 정보를 받을 수 있다. 그리고 다양한 실행 조건에 응용할 수 있는 기능 즉, NA 컨트롤러와의 인터페이스 기능이 있어야 한다. 토폴로지 프로세서는 초기화시에는 전 계통의 변전소 데이터를 처리하고, 이외의 경우는 차단기 및 단로기의 상태가 변경된 변전소에 해당하는 데이터를 처리한다. 물리적 노드로 구성되어 있는 변전소 구성을 전기적 모선으로 구성되어 있는 변전소로 변환해 주는 기능이 있어야 하며, 고립 계통, 설비 요소의 탈락, 편단선로를 검사 및 출력하는 기능, 모선별 미터량(전압, 변압기 탭, 유·무효전력) 할당 기능이 있어야 한다. 또한, 스카다로부터 입력되는 데이터를 신뢰성을 확보하기 위한 비정상 토폴로지 데이터 검사 기능도 있어야 한다. 그리고 모선에 속한 각 설비의 리스트 정보를 저장, 모선 종류(발전기, 부하, 기준 모선) 지정, 모선 구성 및 모선과 설비와의 연결 등의 그래픽 출력 기능 등이 제공되어야 한다. 다음은 설계된 토폴로지 프로세서 기능이다.

- 1) 토폴로지 해석을 위해서는 NA DB에서 Offline data 가져 올 수 있으며, 차단기 정보는 스카다로부터의 상태 정보, 급전원의 수동 입력 정보, 급전원의 계획 입력 정보를 가져온다.
- 2) 토폴로지 프로세서는 다음과 같은 조건에 동작 한다. 첫째, 주기적으로 실행한다. 둘째, 사용자 실행에 의해 첫째와 독립적으로 실행한다. 셋째, 이벤트가 발생할 경우 첫째, 둘째와 독립적으로 실행한다. 실행의 우선순위는 셋째→둘째→첫째 순으로 하며 실행이 중복되는 경우 우선순위가 높은 것을 실행하고 낮은 것은 중지한다. 단 사용자 설정에 따라 프로세서의 동작조건이 변경 가능 및 사용자 지정 회수 초과시 강제로 완료 시켜 상태추정으로 넘기는 기능이 가능해야 한다.
- 3) 입력 차단기/단로기 정보를 이용하여 물리적인 노드(Bus/Section)를 전기적인 모선(Bus/Branch)로 변환하고 Node-Bus Mapping정보를 DB에 저장해야 한다.
- 4) 계통이 고립(island)되어 있는가에 대한 검사, 출력 및 DB 저장이 이루어져야 한다.
- 5) 계통 구성요소가 분리(outage)되어 있는가에 대한 검사, 출력 및 DB 저장이 이루어져야 한다.
- 6) 계통에 대해 편단선로(Open-ended branch)에 대한 검사, 출력 및 DB 저장이 이루어져야 한다.
- 7) 계통에 대한 차단기/단로기 불일치에 대한 검사, 출력 및 DB 저장이 이루어져야 한다. 불일치 차단기와 단로기의 상태는 점검 및 보정하며 급전원에 알린다. 스카다 데이터베이스의 데이터는 그대로 보전하고, NA 데이터만 수정한다.
- 8) 계통에 대한 선로와 모선 기준으로 비정상 Mismatch Mw/Mvar 검사, 출력 및 DB에 저장이 이루어지며, 상태추정에 결과를 전달한다.
- 9) 전기적인 모선에 속한 각 설비의 리스트 정보를 DB에 저장 한다.
- 10) 전기적인 모선의 Type(PV, PQ, Slack)을 지정해주어야 한다.
- 11) 토폴로지 프로세서의 결과는 Bus 구성, Bus와 설비의 연결관계 등을 graphical하게 사용자에게 제공할 수 있어야 한다.

2.3 상태추정 프로그램 개발

상태추정 프로그램에서 사용된 주요 알고리즘은 다음과 같다.

2.3.1 Open ended line

Open ended line은 선로 양단의 CB 중에서 하나만 open되고 다른 한쪽은 계통에 연결되어 있는 경우를 말한다. 이 경우, 유효전력조류는 존재하지 않지만 선로충전용량(line charging) 때문에 모델을 고려하여야 한다. 토폴로지 프로세서는 개방된 선로 말단에 가상 모선을 부여함으로써 계통 모델을 한다.

그림 3. TP BUS 생성 결과

2.3.2 가관측성 해석

다음과 같은 알고리즘을 구축하여 전체 계통에 대한 가관측성을 유지하고 상태추정 해를 구하도록 되어 있다.

- a. 이득행렬(gain matrix)을 factorization하는 과정에서 0의 값을 갖는 대각원소(zero pivot)이 발생하면, 이 계통은 가관측하지 않다.
- b. Zero pivot이 발생한 모선(예를 들면 k번 모선)에 미리 준비해 둔 의사측정데이터(pseudo measurement)를 추가함으로써 가관측성을 확보할 수 있다. 이 의사측정데이터는 주입전력의 형태를 가지게 된다.
- c. 만약, 해당 모선에 대해 준비된 의사측정데이터가 없을 경우, 계통 전체의 가관측성을 확보할 수 없으며 이 계통에는 island가 발생하게 된다. island에 대한 상태추정 연산 수행을 위해 zero pivot은 1로 대치하고 해당 모선의 위상각은 다른 모선의 위상각과 확연히 구분할 수 있는 값으로 대치한 후 factorization을 계속 수행한다.
- d. 이득행렬의 factorization이 완료될 때까지 이와 같은 routine을 반복한다. 그 과정에서 island가 발생할 때마다 새로운 위상각 기준을 설정함으로써 island들을 결정하고 그 결과를 최종적으로 report할 수 있다.
- e. 계통에 island가 발생하였다면, 상태추정 연산 결과에는 각 island별 위상각 기준에 가까운 위상각들이 각각 군을 이루게 되며, 이들이 각각 서로 다른 island를 구성하는 것으로 판단할 수 있다.

2.3.3 의사측정데이터(pseudo measurements)

의사측정데이터 처리 알고리즘은 모든 모선에서 이용 가능한 리스트를 준비하여야 한다. zero pivot이 발생한 모선이 부하모선일 경우에는 부하예측과 BLF 데이터 등으로부터 계산하여 준비한다.

발전기 모선의 경우에는 유효전력 발전량과 모선전압의 의사측정데이터를 이용하게 된다. 발전량은 경제급전(economic dispatch), 기동정지계획(unit commitment) 등으로부터 구할 수 있으며, 모선을 소유하고 있는 회사의 부하함수에 근거하여 모선전압에 대한 의사측정데이터를 선정한다. 각 모선에 부하와 모선전압은 세 구간의 선형함수로 표현하고, 이 곡선을 이용하여 전압 의사측정데이터 값을 선정한다.

Tap load는 변압기의 2차 측에 연결된 부하를 의미한다. 부하가 측정되지 않은 경우, 그 모선에 연결된 전체 부하에 대한 일정한 비율로 미리 계산한 값으로 정하게 된다. 그 모선에 연결된 모든 부하는 연결 선로의 조류 측정값으로 결정할 수 있으며, BLF도 이용한다.

2.3.4 불량데이터(bad data) 처리

상태추정 연산 수렴 후 정규화 오차를 계산하여 불량데이터를 판별한다. 측정데이터 중에서 불량데이터로 판정된 데이터는 입력 데이터에서 제외된 후 상태추정 연산을 재수행한다. 모든 불량데이터가 없어질 때까지 이 과정을 반복한다.

불량데이터를 계속 제거하여 어떤 측정데이터가 critical measurement가 될 경우, 그 측정데이터는 불량데이터로 판정될 수 없다. 따라서 불량데이터를 제거하는 과정에서 계통이 가관측성을 잃게 되는 경우는 없으며, 불량데이터를 제거할 때마다 가관측성의 확보 여부를 다시 판단할 필요도 없다.

2.3.5 복수 전압 측정데이터의 처리

복수 전압 측정데이터의 처리는 다음과 같다. 모선에 대하여 여러 개의 전압 측정데이터가 있을 수 있으며, 이 경우 상태추정은 모든 전압 측정데이터를 입력데이터에 포함하여 처리할 수 있다. 해당 모선에서 모든 전압 측정데이터의 측정 정확도가 같다면(동일한 가중치를 갖는다면), 상태추정 결과는 모든 전압은 동일한 값으로 추정된다. 만약 전압 측정데이터의 정확도에 차이가 있다면 최종 추정값은 더 정확한 데이터(가중치가 높은)의 영향을 더 많이 받아서 결정되며, 역시 모든 추정값은 동일한 것으로 계산된다. 단, 동일 모선에 대한 전압 측정데이터는 서로 선형관계에 있기 때문에 이 데이터들은 critical k-tuple을 형성하고, 따라서 불량데이터가 포함된 경우 불량데이터의 발생은 확인할 수 있으나 어떤 측정데이터가 불량인지를 자동으로 판별하기 어려운 단점이 있다. 이는 차후에 수동으로 검사하는 방법을 사용하여야 할 가능성이 있다.

3. 결 론

전력IT 국책과제로 진행되는 EMS(Energy Management System) Network Applications(NA)의 개발로써 Baseline EMS시스템에 탑재될 응용 프로그램 DB, 토폴로지 프로세서, 상태추정 등 실시간 계통해석에서 사용되는 프로그램들의 개발 현황을 중심으로 기술하였다. 현재 응용 프로그램들은 대부분 설계/구현되었으며 한국전력계통 데이터로 테스트를 진행하고 있으며, 동시에 성능 개선을 진행 중이다. 본 연구 결과는 향후 한국형 EMS의 계통해석 프로그램 개발에 활용될 예정이다.

본 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 연구개발사업(과제번호 : R-2005-1-398-004)으로 수행되었습니다. 관계자분들께 감사드립니다.

[참 고 문 헌]

- [1] F.Maghsoodlou, R. Masiello, and T. Ray, "Energy Management Systems", IEEE Power&Energy Magazine, vol.2, no.5, pp.49-57, 2004.
- [2] 한국전력거래소, KEMS Technical Specification ver2.0, 2006.
- [3] J. Wu and N. N. Schulz, "Overview of CIM-oriented database design and data exchanging in power system applications", Power Symposium, pp.16-20, 2005
- [4] Singh, N. and Glavitsch, H., "Detection and identification of topological Errors in on line power systems analysis", IEEE Trans., Vol. 6, No. 1, Feb. 1991
- [5] 전력IT국책과제 "통합 EMS용 전력계통 해석 프로그램 개발", 1차년도 중간보고서
- [6] L. Holten, A. Gjelsvik, S. Aam, F. Wu and W. Liu, "Comparison of Different Methods for State Estimation," IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 3, No. 4, pp. 1798-1806, 1988.
- [7] Ali Abur and Antonio Exposito, *Power System State Estimation*, Marcel Dekker, 2004.