

한국형 EMS 최적조류계산 적용방안

서은성, 이진수, 이효상, 민상원*, 이정호*
한국전력거래소 한국전기연구원*

Implementation of the Optimal Power Flow in Korean Energy Management System

Eun Sung Seo, Jin Su Lee, Hyo Sang Lee, Sang Won Min*, Jung Ho Lee*
Korea Power Exchange Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract - 본 논문은 한국형 에너지관리시스템(K-EMS)의 발전계획 응용프로그램 기능중 하나인 최적조류계산 기능에 관한 것이다. 최적조류계산(OPF) 기능의 목적은 전력계통의 상태를 향상시킬 수 있는 전력계통 제어요소를 위한 권고사항을 정하는 것이다. 최적조류계산은 또한 계통 조류 방정식을 만족시키는 동시에 발전기 경제 급전 또는 송전 손실 최소화 등의 급전원의 목적에 맞는 제어 요소의 권고 사항을 정할 수 있다는 강점을 지니고 있다. 이에 본 논문에서는 KEMS에서 적용하려는 최적조류계산의 기능 및 적용방안에 대해서 설명하고자 한다.

1. 서 론

최적조류계산(OPF) 기능의 목적은 전력계통의 상태를 향상시킬 수 있는 제어요소의 권고사항을 정하는 것이다. 1962년 카펜티어(Carpentier)에 의해 처음 소개된 최적조류계산 개념은 경제급전에서 출발하여 계통 안전도 향상에 이르고 있으며 계통 조류 방정식을 만족시키는 동시에 경제급전 또는 송전 손실 최소화 등의 목적함수로 급전원의 목적에 맞는 제어 요소의 권고 사항을 정할 수 있다는 강점을 지니고 있다. 또한 최적조류계산은 다른 응용프로그램과 공통적인 계통 모델을 이용하여 해를 최적화 할 수 있으며 상태추정의 결과인 Base Case를 가지고 실행할 수 있으며, Base Case의 저장과 연계 프로그램 상호 전송도 가능하다. 또한 운영자가 저장된 Case를 불러 사용하고 Base Case에서 차단기 상태, 부하수준, 발전기 출력 등의 데이터를 변경하여 전력조류계산(Power Flow) 해석을 실행할 수 있다. 최적조류계산은 실시간 문제를 지원 할 수 있게 설계되어 검토, 분석 툴로서 K-EMS 시스템에 통합되며, 실행 시퀀스는 자동(운영자가 설정하는 주기)이나 수동(운영자 요구)으로 실행되며, 모델 데이터와 SCADA 취득 자료를 이용하여 NA 기능에서 계통을 평가한 후 나온 Base Case에 대한 최적 조류계산과 Study모드 환경에서 최적조류계산 검토가 가능하도록 개발이 진행되고 있다.

2. 본 론

2.1 개요

OPF는 전력계통의 제한 값의 위반사항을 제거하거나 최소화하여 안전성을 개선하고, 연료비용 및 유효전력 손실 등 비용함수를 최소화하는데 목적이 있다. 또한 OPF는 급전원 조류계산(DPF)과 달리 해의 계산에 모션전압, Branch 조류, 유통전력, 예비력 등 제한요소를 고려하여 운영자가 선택하는 목적함수(연료비용 최소화, 전력손실 최소화, 제어동작 최소화)를 최적화 하는데 발전원가 자료, 입찰 가격자료를 입력 받아 유효전력, 위상각, 유통전력 등 제어변수를 조정하여 최적 해를 구하게

된다.

연료비용 최소화는 운전제약 조건을 만족하고 실시간 Base Case 설정 모델에서 최소 제어변수를 변경하여 유효전력 원가를 최적화 하고, 전력 손실 최소화는 프로그램을 작성하여 손실 최소화 제어변수인 위상각, 발전기 모션전압, 탭위치 조정, 발전기 무효전력 제한, 무효전력 조류 제한 등의 제어 변수로 제어 하게 된다. 유효전력 안전도 최적화는 운전제약 조건을 만족하고 실시간 Base Case 설정 모델에서 최소 제어변수를 변경하여 유효전력 원가를 최적화 하고, 무효전력 안전도 최적화는 운전제약 요소를 만족시키기 위해 발전기 모션 전압, 변압기 탭, capacitor/reactor 출력 등 제어변수를 최소화 조정하여 모션전압 제한, 발전기 무효전력 제한 무효전력조류 제한, 제어 변수제한 조건을 만족하는 최적 해를 구하게 된다.

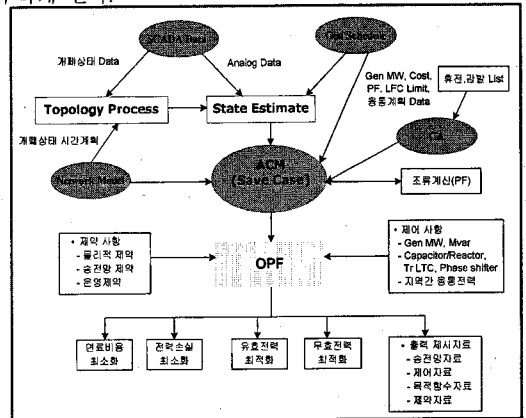


그림1. OPF 입/출력 구성도

운영모드에서는 운영자가 목적함수를 선택할 수 있게 프로그램 실행 모드를 연료비용 최소화, 제어동작 최소화, 손실 최소화 등의 모드를 각각 분리 분리하여 실행할 수 있도록 하였으며 또한 연료비용 최소화와 전력손실 최소화 그리고 제어동작 최소화를 동시에 실행할 수 있도록 설계하였다. 실행결과는 계통상태가 안전한지, 위반사항이 발생하는지를 확인하고, 최적화 계산내용 등을 표출하고, 저장할 수 있게 한다. 실행중 비정상 상태의 메시지, 에러사항, 프로그램의 초기화 작업내용 등은 전용화면을 통하여 제공토록 한다.

2.1.1 인터페이스

OPF 프로그램은 그림2와 같이 주변의 응용프로그램과 연계되도록 구성된다.

- Supervisory Control & Data Acquisition : 실시간 계통 설비의 상태를 RTDB에 저장

- Real Time Database (RTDB) : SCADA정보 저장
- Application Common Model Database : K-EMS의 응용프로그램이 독자적으로 사용하거나 서로 공유하는 정보를 저장한다. K-EMS에서는 응용프로그램 간의 직접적인 연계는 없으며 오직 ACM을 이용하여 상호 간의 정보를 주고받음.
- State Estimator(SE) : SCADA에서 취득하지 못한 계통 정보를 추정하는 기능을 수행.
- Dispatcher Power Flow(DPF) : SE결과를 바탕으로 조류계산을 수행.

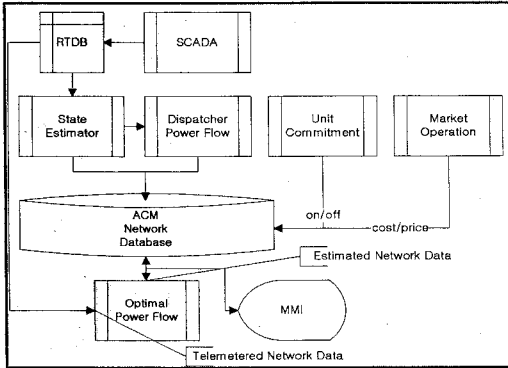


그림2. OPF 연계구성도

2.1.2 OPF 기능 처리

입력값을 받아서 OPF가 실행되면 해의 처리는 제어 권고 사항이나 Network Model로 기술된 case에 모순이 없는 해를 제공하여야 한다.

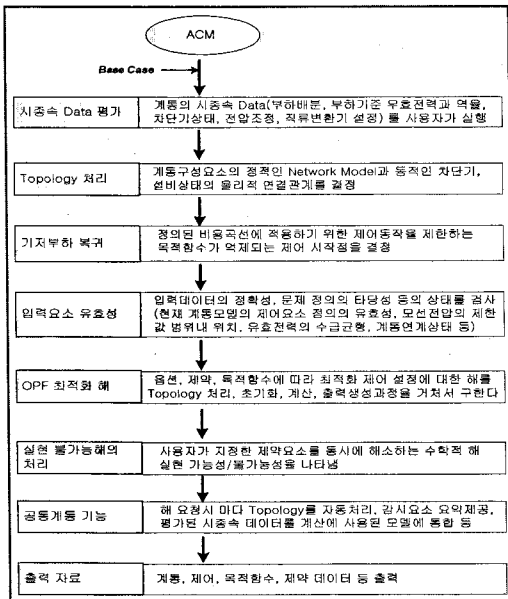


그림3. OPF 기능 처리도

그림3은 OPF의 기능이 진행되는 순서를 나타내고 있는 기능처리순서도이다. 그림에서 보듯이 처음 계통의 모델링된 값에 의해 특정시간에 주어진 조건으로 계통상태가 결정되면(base case), Study 환경에서 Network의 정상상태를 결정하고, 시중속 데이터와 구성요소의 상태를 설정(시중속data 평가), Network 상태 해를 도출하고

(Topology 처리) 제한치 위반사항을 검출하는 조류계산을 기본으로 수행(입력요소 유효성)하여 제어요소(Unit MW 및 Unit MVar의 제한 출력, Capacitor/ Reactor 출력, Tr LTC 및 Phase Shifters Taps 위치, Area Transaction 양 등)에 해당하는 제어장치를 대상으로 물리적인 조절을 통해 송전선력을 조정하며 운영제약 사항을 고려하여 OPF의 목적함수를 만족시키도록 계산을 시행하게 된다.(OPF 최적화해)

출력자료에서는 송전망 자료(실행 전 입력사항 및 실행 후 추천되는 결과치), 제어자료 (실행결과 새로 추천되는 제어 설정치, 기본 값에서 추천 값으로 설정 값 변화, 새로운 제어 비용, 기본 값에서 추천 값까지의 비용 변화, 목적함수 자료로 기본제어 설정 값에서 계산된 원 목적함수 값, 최종 목적함수 값 등), 목적함수 값(유효전력 공급비용, 유효전력 안전도, 무효전력 안전도, 유효전력 손실 등)변화, 제약 자료로 실행 시 지정된 모든 제약사항 목록과 현재 구속되는 제약사항 목록 등을 출력으로 제시하게 된다.

2.1.3 OPF 프로그램의 구성

OPF 프로그램은 입력부, OPF처리부, 출력부, 사용자 인터페이스로 구성되어 있다.

2.1.3.1 입력부

- Network Model(Base case)
 - Network Topology
 - Impedance 등 전기적 모델, 부하모델
 - 비제어 장치의 조정계획
 - 상태감시 그룹 및 제약조건
 - 제어요소의 중/감발률, 발전기 무효전력 용량곡선
- 제약모델
 - 유효/무효전력 모션 mismatch
 - 지역간 용통전력, 조정된 모션전압
 - OPF제어요소
 - 모션전압 크기(PU), 선로조류, 직렬기기조류
 - 변압기조류, zero impedance 선로조류
 - node pair 위상각
 - interface 제약, 운전예비력, 제약한계 지정
- Contingency Model
 - Group Constrains / Individual Constrains
- Control Model
 - 발전기 유효/무효전력, 조정된 모션전압
 - 변압기 탭, 위상변환기 탭, 조상설비
 - 지역간 용통전력 제한값
 - 비용곡선
- 목적함수 Model
 - 발전비용 최소화
 - 전력 손실 최소화
 - 최대 무효전력 예비력
 - 기타 목적함수
 - 실현 가능 해 목적함수

2.1.3.2 출력부

- 계통데이터
 - OPF 실행전후 case에 대한 상태 감시요소
- 제어데이터
 - 새로운 제어조치 권고
 - 기준값에서 권고값까지 설정치 변경값
 - 새로운 제어 비용
 - 기준값에서 권고값까지 비용 변경값
- 목적함수 데이터
 - Base Case에서 계산된 당초 목적함수
 - 최종 목적 함수 값
 - 목적함수 값의 변경값
- 제약데이터
 - 현재 지정된 감시 제약목록

- 현재 제약된 활성 제약 목록

2.1.3.3 사용자 인터페이스

- 기타 사용자 인터페이스 화면
- OPF 결과 메시지

2.2 OPF의 내부알고리즘 및 실행모드

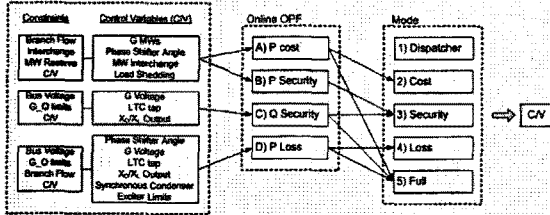


그림4. 최적조류계산 구성도

그림4는 OPF에서 적용할 내부 알고리즘의 계산 구성도로서 OPF의 주요 목적함수, 각 해당 목적함수와 관련한 제약조건, 제어변수 등 운영자 선택옵션을 실행할 수 있도록 구성되어 있다. 최적조류계산은 운영자의 설정 주기 또는 수동요구에 의해 수행되며, 기본적인 문제의 정식화는 선형화를 기반으로 이루어진다. 실행 모드에 따른 각각의 목적함수 및 제약조건, 제어변수들에 대한 설명은 다음절에서 하도록 하겠다.

2.2.1 발전비용 최소화

발전비용 최소화 목적함수는 기본적으로 SCED의 목적함수와 같이 보이며 수학적 모델링에서는 차이가 없지만, 제어할 수 있는 변수에 부하차단을 고려하고 있기 때문에 차단가능 부하(Interruptible Load)량을 내포하고 있다. 즉, 차단 가능 부하량은 현재 제약에 의해 비용이 지불되고 있기 때문에 이를 바탕으로 가상으로 비용함수화 할 수 있으며, 이 때 부하 차단량은 음(-)의 값으로 처리가 되고 비용은 양(+)의 값으로 처리가 되는 선형함수의 절대방정식 형태로 모델링 된다. 이밖에 발전비용의 최소화를 위해서 수급균형 등식제약, 발전기 출력 운영제약, 선로의 열적한계를 고려한 송전제약 등을 반영하며 제어변수로는 발전기 출력, 위상각, 유효전력, 부하차단 등을 고려하게 된다.

2.2.2 유효전력 안전도 최적화

유효전력 안전도 최적화에는 계통 안전도 향상을 위해 이용되는 제어기의 제어량을 최소화하는 문제와 제어되는 제어기의 수를 최소화하는 두 가지의 문제로 정의된다. 일차적으로 고려해야 할 사항은 각각의 제어기를 가상의 비용함수로 만드는 것이고 목적함수를 발전기에 대한 비용함수(차단가능 부하 포함), 제어기의 가상 비용함수, 부하차단에 따른 가상의 비용함수로 설정하게 된다. 여기서 각각의 비용함수에 가중치(w : 0 또는 1)를 두어 사용하는 제어부분을 사용자가 선택할 수 있도록 수학적으로 모델링 한다.

2.2.3 무효전력 안전도 최적화

무효전력/전압 안전도 최적화 문제는 비용최소화 문제 및 유효전력 안전도 최적화 문제와 달리 무효전력에 대한 비용을 산출하는 것이 어려운 일이므로, 기본적으로 제어기의 제어량 변화분의 최소화를 바탕으로 목적함수가 고려된다. 목적함수는 가상의 penalty 함수로 표현 가능하며, 선형함수의 절대방정식 형태로 표현된다. 제어변수는 발전기의 전압, 변압기 탭, Capacitor/Reactor 개폐 등을 고려하고 있으며, 이들의 제어에 따른 등가적인 무효전력 출력량은 각 제어기의 제어변수에 대한 함수로 표현 된다.

2.2.4 계통손실 최소화

계통 손실의 최소화 문제는 계통 전압 프로파일 향상과 밀접한 관계가 있으므로, 무효전력/전압 안전도 최적화 문제의 제어변수와 동일하게 다룰 수 있다. 유효전력과 관련된 제어변수는 경제급전의 목적에 주로 사용하게 되므로 이러한 문제를 다루기 전에 미리 최적화를 수행하고 무효전력 제어변수들만 본 최적화 문제에서 다루는 것으로 가정한다. 그리고 목적함수의 표현에 있어서 계통손실의 비선형적인 특성을 선형화하기 위하여 민감도를 활용하여 나타낸다. 목적함수에 표시된 민감도 부분은 변압기 탭에 대한 손실의 민감도, 발전기 전압제어에 대한 손실 민감도, 부하단에 설치된 무효전력 제어기의 손실 민감도로 나누게 된다.

2.2.5 Full 기능

발전비용 최소화, 유효 및 무효전력 안전도 최적화, 계통손실 최소화 등의 모든 기능을 수행하는 모드

3. 결 론

본 글에서는 현재 진행되고 있는 한국형EMS개발에 적용되는 최적조류계산 프로그램에 대해서 설명하였다. 현재 EMS 개발에 있어 최적조류계산의 개발과정은 초기 단계이므로 현재 개발시 적용사항만을 설명하였지만 이후 알고리즘 구현과 검증을 위한 단계별 시험, 즉, 알고리즘 자체 시험을 위한 단위시험, EMS에서의 시스템 기능과 응용프로그램의 통합시험, 실제용 데이터를 이용한 실증시험 등을 통해 응용프로그램의 적용성을 강화해 나갈 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] Korean Energy Management System Technical specification, 한국전력거래소, 2006
- [2] Wen Juan Zhang, Fang Xing Li, Leon M. Tolbert, "Review of Reactive Power Planning: Objectives, Constraints, and Algorithms", IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS, VOL. 22, NO. 4, NOVEMBER 2007
- [3] Allen J. Wood, "Power Generation, Operation, And Control", 2nd Edition, John Wiley & Sons, Inc., 1996

한국형 EMS 개발은 산업자원부의 전력산업연구개발사업으로 수행중인 사업입니다.