전력계통 해석 ③

글/이 강 완 대화기술단 기술사사무소/기술사
☎ 02)568-5680, daehwaen@unitel.co.kr

사. 과도현상 해석

오늘날 전력에너지를 사용하고 있는 가정, 사무실 및 산업체 등 전력수요 전반에 걸쳐 전력품질(Power Quality)에 민감하게 반응하는 다양한 전기설비들이 많이 사용되고 있다. 즉, 컴퓨터를 비롯한 정보관리시스템, 산업체 공정제어설비, 에너지관리시스템(EMS: Energy Management System), 전자현금취급기 및 안전시스템(Security System) 등은 전력품질 상태에 따라서 데이터 또는 기억내용 상실, 자료송수신 오류 및 설비 손상이 발생하기도 한다.

특히 생산공정이 많은 산업체에서 서지, 순시전압저하, 순시전압상승, 전기잡음 및 주파수 왜형과 같은 전력품질 저하로 인하여 공정제어 설비의 중대한 사고 정지가 발생되고 대형공장에서 생산공정 전체가 멈추어 버리는 심각한 사고로 진행되는 사례들이 국내외에 빈번하게 보고되고 있는 실정이다.

전력품질에 직접 영향을 미치는 뇌격, 개폐기 스위칭 또는 고장 등으로 발생하는 전력계통의 과도현상은 매우 빠른 전압 변화로 일어나는 일종의 전기적 교란이다. 이와 같은 전기적 교란은 컴퓨터 또는 제어설비의 이상 동작, 설비 손상은 물론 전력설비 전반에 걸쳐 절연강도에 영향을 미치고 차단기의 경우 정격내력에 영향을 미치게 되는 비교적 심각한 문제를 야기하므로 과도현상의 정확한 이해와 이의 해석 및 전력계통이 운용되고 있는 현장에서의 적절한 분석 등이 절실히 필요한 실정이다.

표 1은 전력계통에서 발생할 수 있는 전압변동 유형을 나타낸 것이다.

다양한 형태로 나타나는 과도현상은 앞에서 언급된 안정도 해석에서와 같이 단일 주파수 영역에서 발생되는 것이 아니므로 기존의 정상상태 해석에 이용되는 페이서(Phaser)로 현상을 분석할 수 없고 대부분 미분 연립방정식을 풀어야 한다.

실제로 전력계통 과도현상 해석 또는 분석에는 2가지 방법을 생각할 수 있다.

첫째, 실제 전력계통을 구성하고 있는 설비요소들을 일정 비율로 축소하여 전력계통을 하드웨어적으로 모의하는 TNA(Transient Network Analysis)가 있다. TNA를 이용한 과도현상 해석은 실제현상에 근접한 결과를 가시적으로 보게 되므로 이해가 빠르고 이의 검증이 비교적 용이한 반면에 계통 변경 또는 증대에 대응하는 융통성이 결여되어 있고 계통모의 회로 구성에 많은 시간이 소요될 뿐 아니라 초기 도입 및 설치 비용과 이의 유지보수 비용도 상대적으로 많아 전력회사와 같이 필연적으로 다양한 과도현상 해석이 필요한 경우에만 한정적으로 이용되고 있는 실정이다.

둘째, 오늘날 널리 이용되고 있는 디지털컴퓨터를 이용한 수치해석프로그램으로 전력계

표 1 전압변동 유형

종 류	특 성	유입 통로	원 인	장 해	해결 방안
과도 (Transient)	과전압 과전류 0.001초 이하	전력선 통신선 데이터 전송선	뇌격 차단기 조작 고장제거 지락고장	데이터 오류 전자설비 손상 오동작	서지억제기 필터 분리변압기
과전압 (Swell)	과전압 1 ~ 수 사이클	전력선 고장전력계통	급격한 부하제거 원격 고장	하드웨어 손상 차단기 트립 데이터 오류	전압조정기 Line Conditioner UPS 철공진 변압기
저전압 (Sag)	저전압 1 ~ 수 사이클	전력선 고장전력계통	전동기 기동 과부하회로 선로고장 급격한 부하변동	전자설비 정지 전동기 과열 차단기 트립	전압조정기 Line Conditioner UPS 철공진 변압기
잡음 (Noise)	60Hz 이외의 전기 신호	전력선 통신선 데이터 전송선	전력전자 스위칭 Variable Speed Driver 스위치형태 전원	동작 오류 데이터 손상	필터 전화선 데이터 전송선
고조파 (Harmonics)	전류 왜형 전압 왜형	전력계통 전력 설비	비선형 부하 아크로 아크용접기	전력설비 과열 전자설비 손상 케이블 과열 변압기 과열	필터 특수 변압기

통의 과도현상을 해석하는 방법이다.

전력계통의 과도현상 해석용으로 이용되고 있는 프로그램은 EMTP(Electro Magnetic Transient Program), TRANSO, ECAP 및 CSMP 등이 있으나 이들 중 EMTP가 세계적으로 가장 많이 폭넓게 다양한 과도현상 해석에 이용되고 있다.

우리나라에서는 이의 이용 증진과 관련 이론 연구 활성화 및 기술정보 교환을 목적으로 1986년 EMTP 국내위원회를 발족하여 교육 및 관련논문 발표회 등을 매년 개최하고 학계, 연구소 및 산업체 등에서 여기에 참여해 오고 있다.

EMTP는 전력계통의 고속 과도현상을 모의하는 범용컴퓨터 프로그램으로서 뇌격현상에서 전기기기의 축 진동까지 해석 가능한 것으로 1960년대 후반 미국 BPA(Bonneville Power Administration)의 Herman W. Dommel씨에 의해 최초로 개발되었으며, 이는 기존의 TNA를 대체하기 위한 일종의 디지털컴퓨터 프로그램이다. 따라서 초기에는 뇌서지, 스위칭서지 및 절연협조 분석에 이용되었다. 초기 EMTP는 어드미턴스 매트릭스를 반복 삼각화법으로 미적분해를 구하는 형태였으나 그후 동기발전기, 싸이리스터(Thyrister), 제어기 및 회전기기 모델이 추가되어 교류-직류변환기 해석 및 주파수 왜곡현상 해석도 가능한 범용성이 풍부한 전력계통 해석 프로그램이 되었다.

EMTP는 전력계통의 정상 및 과도상태 해석을 목적으로 개발되었으나, 일반적인 전기회로 및 전자회로와 전기회로에 의해 표현 가능한 물리계의 해석도 적용할 수 있게 개발되었다.

EMTP 해석분야는 크게 절연협조, 기기의 정격, 보호장치 사양, 제어계 설계 등을 포함하는 전력계통 설계분야와 전력품질에 영향을 미치는 과도현상 등의 전력계통 운용상에 나타나는 문제점 분석 및 해결을 위한 분야로

대별할 수 있는데, 전형적인 EMTP 해석 분야는 다음과 같다.

- 개폐서지 해석
  - 확정론적 방법에 의한 해석
  - 확률론적 방법에 의한 해석
  - 스위치류 개폐
  - 과도회복 전압
  - 케이블 개폐 과도현상
- 뇌서지 해석
  - 역섬락
  - 차폐 실패에 의한 침입 서지
  - 변전소 침입 서지
- 절연 협조
  - 가공선로
  - 옥외 변전소
  - GIS
  - 피뢰기 책무
- HVDC
  - 제어
  - 과전압, 고조파 현상
- 정지형무효전력보상장치(SVC)
  - 제어
  - 과전압, 고조파 현상
- 전송파의 전파
- 고조파
- 철공진
- 평행선로 공진
- 전동기 기동
- 동기 탈조
- 제어계 해석

EMTP 프로그램으로 모의 할 수 있는 전력계통 구성 요소는 다음과 같다.

- RLC 요소
- 가공선로
- 지중케이블
- 부하
- 변압기
- 피뢰기
- 전원(Source)
- 회전기기
- 스위치
- 비선형요소(Nonlinear Elements)
- 제어계(Control System)

최근 산업현장에는 생산성 제고 및 효율 증진을 위하여 많은 분산제어시스템(DCS: Distribution Control System)들이 설치되어 운전되고 있으나, 전력품질 저하로 인하여 이와 같은 제어설비들이 불시에 정지되어 막대한 손실을 발생 시키고 있는 사례 들이 국내외에서 자주 보고되고 있다. 다음 그림 1은 산업체 전력계통에 설치되어있는 고압 전력용 콘덴서 투입에 따른 분산제어시스템 직류전압이 순간 과전압이 되는 형태를 과도현상 해석 프로그램인 EMTP로 모의한 결과를 나타낸 것이다.

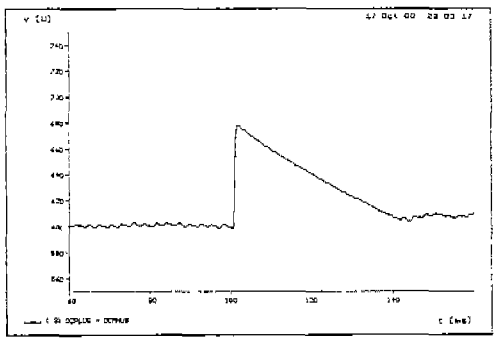


그림 1 콘덴서 투입 관련 DCS 직류전압 (장해대책 무)

그림 2는 고압 전력용 콘덴서 투입에 따른 과도현상 장해 대책으로 분산제어시스템 전단에 3%(분산제어시스템 용량 기준)초크를 설치한 경우 분산제어시스템 직류전압 형태를 과도현상 해석 프로그램인 EMTP로 모의한 결과를 나타낸 것이다.

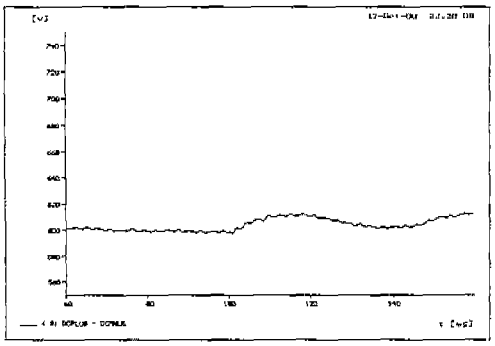
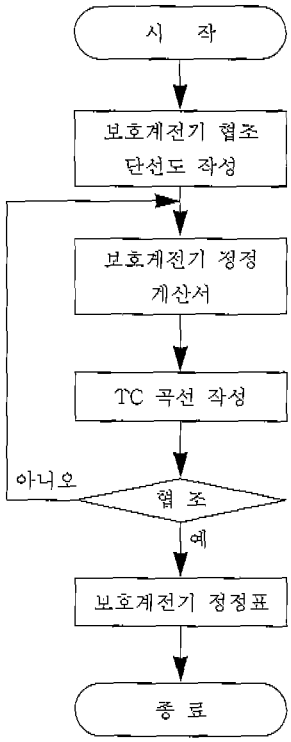


그림 2 콘덴서 투입 관련 DCS 직류전압
(장해대책 3% 초크 설치)

과도현상 해석은 이와 같이 전력계통에 발생한 전력품질 문제를 정확히 분석해 내고, 이를 기본으로 하여 효과적이고 실질적인 대처 방안을 수립할 수 있게 한다.

아. 보호계전기 협조

전력계통을 구성하고 있는 각종 전력설비는 자연에 노출되어 있어 사고의 위험이 있으며, 지중화 또는 옥내에 설치되어 있는 전력설비도 전기적, 기계적 강도 및 절연계급 등이 일정 한도로 제한되어 있어 사용 시간이 누적되면서 열화되어 사고를 일으키게 된다. 보호계전기는 전력계통을 구성하고 있는 전력설비를 감시하여 절연 파괴 등과 같은 고장이 발생하거나 전력계통에 이상이 발생했을 때 이를 검출하여 고장 부분을 최단 시간 내에 계통으로부터 분리함으로써 전력공급 지장을 최소화하



- 전력 단선도
  - 전압
  - 보호계전기 규격, 형식
  - 변압기 용량, 임피던스, 결선
  - 케이블 규격
  - 전동기 용량
- 보호계전기 정정 계산서
  - CT비 선정 내역
  - 보호계전기 정정 근거
- TC 곡선
  - 보호계전기(퓨즈, 전동기계전기, LVCB)TC곡선
  - 변압기 정격, 돌입전류
  - 케이블 단시간 정격
  - 전동기 기동 곡선
  - 고장전류(3상, 1상 지락)
- 보호계전기 정정표
  - 보호계전기 형식, 정정범위, 정정치
  - CT, PT비
  - 관련 배전반

그림 3 보호계전기 정정 및 협조 처리 순서도

고 아울러 전력설비의 손상을 억제하는 기능을 갖는다. 전력계통이 이상 없이 운전될 때는 보호계전기가 불필요한 것처럼 보이지만 단락 또는 지락고장 등의 이상현상이 일어날 때 즉시 보호계전기는 사용 목적에 맞도록 동작하여 최단 시간에 최소 사고 부분을 분리함으로써 사고파급을 억제하고, 전력공급의 신뢰성을 높이며 설비 손상을 최소화한다. 일반적으로 보호계전기가 고장을 감지하여 응동을 시작하는 값과 고장구간을 구별하기 위해 동작시간 등을 결정하는 것을 보호계전기 정정이라 하고 여기서 결정된 값을 정정치라고 한다. 따라서 보호계전기는 적정 정정치로 조정되어 있을 때 그 본래의 의무인 최적의 감시 및 고장구간 분리 기능 수행을 다하게 된다.

전력계통 내에서 보호계전기에 의하여 고장부분 또는 고장 구간을 판별하는 방법은 고장전류, 전압 크기 및 위상각, 시간, 방향 비교, 차동 및 로직에 의존하게 된다.

보호계전기 협조는 전력계통에 발생한 고장

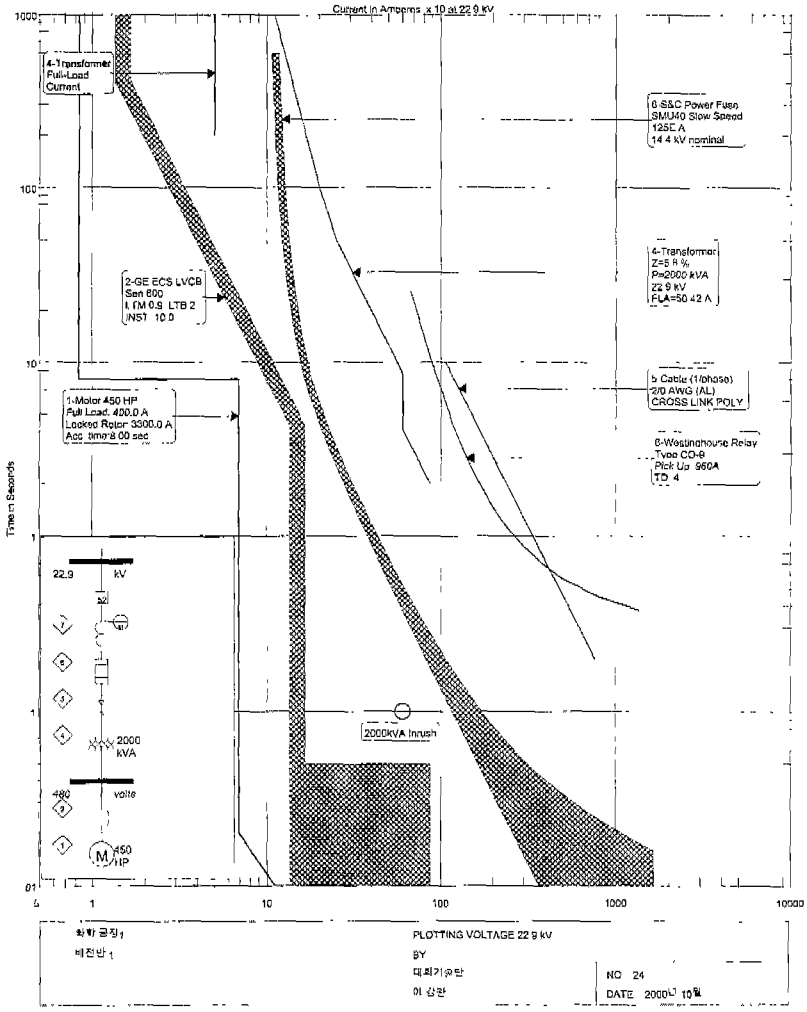


그림 4 보호계전기 협조 T-C곡선 예

을 검출하여 정확히 해당설비 또는 해당 구간을 판단하도록 인접 설비 또는 인접 구간 보호계전기와 서로 협조 되도록 정정치 및 동작시간을 인접한 보호계전기 또는 연관된 보호계전기 즉, 전위 및 후위 보호계전기와 비교하여 결정함으로써 인접한 보호계전기와 함께 고장구간을 정확하게 구분할 수 있도록 하는 것을 뜻한다.

대부분 수지상 형태로 구성되어 있는 산업체 전력계통의 경우 과전류에 의해 동작되는 보호설비인 과전류계전기(OCR), 전동기계전기(Motor Relay), 퓨즈(Fuse), 저압차단기(LVCB) 및 리크로저(Recloser) 등은 전류 크기와 동작시간에 따라 인접 보호설비와 협조되어 고장구간을 판단하게 된다. 따라서 전류와 동작시간을 판단할 수 있는 시간-전류곡선(TCC: Time-Current Curve)을 그려서 보호협조의 적정성을 검토하고 판단하게 된다.

그림 3은 보호계전기 정정 및 협조 처리 순서를 나타낸 것이다.

이중에서 보호계전기 정정 계산서에는 CT비 선정 내역과 보호계전기 정정 근거를 제시하여야 한다.

TC 곡선에는 보호계전기(퓨즈, 전동기계전기, LVCB 및 리크로저) 동작 특성 곡선, 변압기 정격 및 돌입 전류, 전동기 기동곡선 및 고장전류(3상단락 및 1상지락 고장전류)를 표시하여 협조의 적정성을 용이하게 판별할 수 있게 한다. 보호계전기 정정표에는 보호계전기 형식, 정정범위, 정정치, CT 및 PT비 및 관련 배전반 이름을 명시하여 현장에서 보호계전기 정정 작업을 용이하게 수행할 수 있게 한다.

일반적으로 전력계통 신설 및 변경의 경우 보호계전기 정정이 필요하다. 다음은 보호계전기를 최적의 상태로 운영하기 위하여 보호계전기 정정이 필요한 경우를 나열한 것이다.

- 전력설비(발전기, 변압기, 송배전선, 모선, SC, SR 등) 신·증설시
- 전력계통 구성이 변경되었을 때
- 전력계통 운전 모형이 변경되었을 때
- 계전기용 변성기(CT, PD 또는 PT) 교체 또는 변압, 변류비 변경시
- 송배전선로 장체시 및 부하 증가시
- 배전반 및 계전기 대체시
- 보호계전기 오동작 및 부동작이 있을 때
- 기타 필요하다고 인정되는 변동 사항이 있을 때

오늘날 보호계전기 협조(Protective Device Coordination)는 프로그램을 이용하는 것이 일반화 되어 있는 추세이다. 특히, 보호계전기 협조를 정확히 용이하게 판단할 수 있는 TC 곡선을 보호계전기 협조프로그램으로 작성하는 것이 바람직하다. 보호계전기 협조 프로그램은 필요 충분한 데이터베이스가 구축되어 있어 이를 활용하도록 하며, 새로운 보호설비의 경우는 이를 데이터베이스에 이용자가 추가하여 구축할 수 있어야 한다.

그림 4는 보호계전기 협조 프로그램으로 작성된 T-C곡선 예를 나타낸 것이다.

3. 전력계통 해석업무 처리 절차

전력계통 해석업무는 그 사용 목적에 따라 그리고 해당 전력계통 규모나 구성 형태에 따라 내용과 범위가 다르게 될 것이다. 즉, 초기 전력계통 기본 계획의 경우 주로 조류계산, 고장전류 계산, 전동기 기동해석 및 고조파 해석 등으로 계통 구성 형태와 중요 설비 제원을 결정하게 된다. 반면에 자가발전기가 있는 전력계통의 신설 및 증설의 경우는 조류계산, 고장전류계산, 안정도 해석, 전동기 기동 해석, 부하차단 해석 및 보호계전기 협조까지를 포함하게 된다. 전력계통에 고조파 발생 설비가 있거나 또는 전력 품질에 민감한 설비가 있는 경우 그리고 제어설비 등의 오동작과 같은 문제 등이 발생되는 경우는 고조파 해석과 과도현상 해석 등을 포함하도록 하고, 보다 정확한 현상파악 및 전력계통 해석 결과 실효성 등을 입증하기 위해 현장 자료 측정을 실시하는 것이 바람직 할 것이다.

표 2 전력계통 해석 업무 처리 절차

단계별 업무	업무 내용
1) 자료 조사	- 전력계통 구성, 특성 및 설비 자료조사
2) 현장 자료 측정	- 전력조류, 전압 및 고조파 측정
3) 데이터 베이스 구축	- 전력계통 해석용 데이터베이스 구축
4) 전력계통 해석	- 조류계산 고장전류 계산 안정도 해석 전동기 기동 해석 부하차단 해석 고조파 해석 과도현상 해석 보호계전기 정정
5) 보고서	- 보고서 작성 및 설명회

표 2는 일반적인 전력계통 해석 업무 처리 절차를 나타낸 것이다. 전력계통 해석의 정확성 및 실효성이 각종 소프트웨어의 데이터베이스임을 감안하여 데이터베이스의 정확한 구축 및 업무의 효율성 등을 제고하도록 효율적인 데이터베이스 유지보수가 필요하다.

그림 5는 전력계통 해석 업무 처리 흐름도를 나타낸 것이다. 여기에 나타난 것과 같이 전력계통 해석 소프트웨어는 서로 보완 및 상관 관계를 유지하게 되므로 이를 감안하여 전력계통 해석 범위를 정해야 된다. 즉, 안정도 해석 및 고조파 해석의 경우는 조류계산이 먼저 수행되어 조류계산 결과가 안정도 해석 또는 고조파 해석의 기본 자료로 활용된다.

기존의 전력계통에 고조파 및 과도현상에 의한 문제가 발생한 경우는 고조파 해석 및 과도현상 해석과 병행하여 현장 측정을 실시

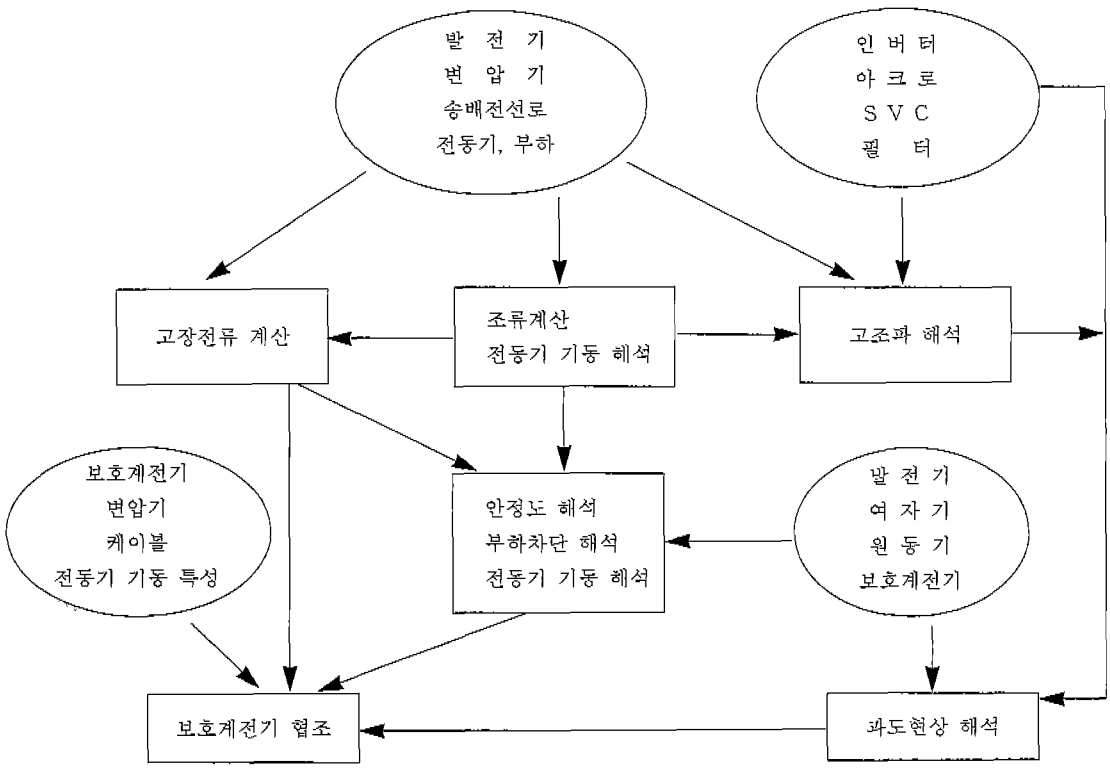


그림 5 전력계통 해석 업무 흐름도

표 3 전력계통 해석

전력계통 해석	해석 내용	목적 및 필요성
조류계산	전력 생산에서 소비에 이르기까지 각 모선 및 각 전력설비의 전압, 전류 및 유효·무효 전력 계산	전력계통 구성 및 운전 모형 전압 조정 기본 자료 과부하 조사 및 해소 대책 수립 전력용 콘덴서 위치와 용량 결정 전력설비 용량 결정 전동기 기동 검토 안정도 해석 및 고조파 해석 입력자료
고장전류계산	여러가지 전기고장시 각 모선 및 각 전력설비에 나타나는 전압, 전류 및 유효·무효 전력 계산	전력계통 구성 방안 차단기를 포함한 전력설비 규격 결정 접지 방안 보호설비 정정치 계산 고장전류 억제 대책 수립
안정도해석	전력계통의 단락, 지락, 회로 차단, 재폐로, 부하투입 제거 및 발전기 탈락과 같은 외란에서 안정도를 판단하기 위한 각 모선의 전압과 주파수 및 발전기 속도, 상차각, 전압 전력 및 여자기 동특성 해석	전력계통 구성 및 운전 모형 보호계전 시스템 구성 및 운영 방안 모선절체와 같은 설비 조작 방안 전동기 기동 문제점 분석 및 기동방안 수립 전력계통 안정화 대책 수립 보호계전기 정정 부하차단 방안 수립
전동기 기동 해석	전동기 기동시 전압, 전류, 역률, 속도 및 토크 계산	전동기 기동 문제점 해석 및 분석 적정 전동기 기동방안 선정 경제적인 변압기 선정 최적 전력계통 구성 방안 도출
부하차단해석	전원탈락(연계선 개방)시 계통 특성에 따라 급격하게 강하하는 계통주파수 및 전압이 단계별로 부하차단으로 계통 붕괴없이 정상회복하는 과정을 동적으로 모의 계산	전력계통 구성 및 운전 모형 계통 안정화 장치(Power System Stabilizing Controller) 설계 부하차단 방안 선정 저주파수 및 저전압 계전기 정정
고조파해석	전력계통에 발생하는 고조파 전압, 전류 및 전력을 계산하고 고조파에 의한 직·병렬 공진 가능성 계산	고조파 영향 분석 고조파 억제 전력계통 구성방안 수립 필터(Passive 또는 Active Filter)설계 콘덴서 뱅크 이상 고장 분석
과도현상해석	뇌격, 개폐기 스위칭 또는 고장 등으로 발생하는 전력계통의 빠른 전압 변동 상태를 모의 분석	전력품질 저하 문제 해석 전력품질 향상 방안 수립 절연 협조 뇌서지 보호 설비 제어설비 분석 및 설계 보호설비 분석 및 설계 필터 설계
보호계전기 협조	보호설비의 적정 협조를 확인 점검할 수 있도록 보호설비 동작곡선을 TC 도면에 작성	보호시스템 구성 방안 보호계전기 협조 변압기, 케이블 등 적정 규격 선정

하는 것이 바람직하다.

즉, 고조파 해석 및 과도현상 해석 결과와 현장 실측값을 비교하여 전력계통 모의 적정성을 입증하고 필요한 경우 고조파 또는 과도현상 저감 대책을 수립하고 이를 소프트웨어적으로 모의하여 고조파 또는 과도현상 저감 효과 및 이의 영향을 평가함으로써 실질적이고 효과적인 고조파 또는 과도현상 저감 대책 수립을 가능하게 한다.

4. 결 론

전력계통에서는 대량의 전력에너지를 경제적으로 저장할 수 있는 방법이 없어 생산과 소비가 동시에 일어나야 되는 특성이 있으며, 발전과 수요의 불균형은 전력품질 평가 중요 요소인 주파수 변화를 일으키게 된다.

전력품질을 크게 나누면 정주파수와 정전압 유지이다.

그러나 전력계통의 동특성인 주파수와 전압은 끊임없이 변동한다. 전력공급의 신뢰성을 저하시키는 전기적 사고는 전력계통의 내적 및 외적 요인에 의하여 불가피 하게 발생한다.

이와 같은 특성을 지닌 전력계통이 그 본래의 의무를 다하기 위해서는 기본 계획, 설계 및 설치 단계별로 그리고 운전 단계에서도 전력계통의 정적 및 동적인 특성을 충분히 파악하고, 필요한 경우 적절한 대책을 수립할 수 있도록 소프트웨어적인 모의(Simulation)를 수행할 필요가 있다.

다음은 전력계통 해석이 필요한 사유를 나열한 것이다.

- 전력계통 규모확대 및 구성의 복잡화
- 전력계통 계획, 설계, 시공과 운용 최적화
- 전력계통 구성의 최적화
- 전력설비 적정 규격 및 용량 선정
- 양호한 보호계전 방식 설계 및 운영
- 비선형 전력설비 증대 대처
- 전력설비의 민감도 고조
- 각종 제어설비 오동작 및 손상
- 불필요한 설비 손상 및 차단기 트립
- 변압기, 선로 및 전동기 과열

전력계통의 신·증설, 변경 또는 운전 조건 변경시 전력계통 해석을 수행하고 필요에 따라 설비 교체, 전력계통 구성 형태 변경, 고장전류 저감 대책, 안정화 대책, 고조파 저감 대책, 과도현상 저감 대책 수립과 보호계전 설비 정정 수정 등을 실시해야 한다.

전력계통에서의 전기사고는 불가피하다. 그러므로 전력계통을 상시 건전한 상태로 운용하기 위해서는 각종설비를 정기적으로 또는 수시로 점검 보수할 필요가 있다.

그러나 아무리 최선을 다한 유지보수라 하더라도 이들 설비의 전기적 고장을 완전히 배제할 수 없음을 감안하여 실계통에 적합한 체계적이고 지속적인 신뢰도 향상 방안의 연구 노력이 필요하며, 전력설비 유지보수 요원의 지속적인 교육훈련도 필요하다.

표 3은 전력계통 해석 분야별로 해석 내용, 목적과 필요성을 간략하게 종합 정리한 것이다.