



## 전력계통 해석 ①

글/이강완 대화기술단 기술사사무소/기술사

☎ 02)568-5680, daehwaen@unitel.co.kr

**전**력은 산업체 생산공정의 중추적인 에너지원이다. 전력생산에서 사용에 이르기까지를 담당하는 전력계통은 다양한 전력설비들이 유기적으로 결합되어 운용되고 있는 시스템이다. 이와 같은 전력계통은

- ① 규정전압과 규정주파수를 유지하는 양질의 전력을
- ② 충분한 경제성을 유지하며
- ③ 정전을 최소화하는 공급신뢰성이 보장되도록 설계, 설치 및 운용

되어야 한다. 그러나 전력계통이 가지고 있는 내적 및 외적 요인에 의하여 전력계통에 고장이 발생하고 전기적 고장으로 인하여 전력공급에 지장을 초래하는 정전이 발생하고 있으며 특히 오늘날 산업체에서는 전력품질에 민감하게 반응하는 많은 전력설비들이 채택되어 운전되고 있어 순간전압 동요 또는 고조파와 같은 불량 교란으로 전자설비의 오동작 등이 발생하고 이로 인하여 생산공정의 일부가 정지되어 기업의 생산성을 저해하는 사례가 빈번히 보고되고 있다. 따라서 전력계통이 그 본래 의무를 다하기 위한 기능을 경제적으로 충분하고도 필요한 신뢰도와 안정도 상태 하에서 적정 전력품질 유지가 가능할 것인지를 조사 평가할 수 있는 다양한 전력계통 해석 소프트웨어를 소개하고 산업체 전력계통에서 이의 활용 방안 및 적용 사례를 예시하고자 함

### 1. 배경

대량의 전력에너지를 사용하는 산업체 전력계통은 대부분 한국전력과 22.9kV 또는 154kV 송배전선로로 연계되어 전력을 공급받고 있으며 전력에너지와 함께 열에너지를 사용하거나 또는 전력만 사용하는 산업체라도 자가발전기들을 설치하여 전력회사 전력계통

과 병렬운전하는 경우가 많다. 이와 같이 자가발전기들을 전력회사 전력계통과 병렬연계 운전함으로써 전력공급의 신뢰성 및 경제성을 높일 수 있으나 발전기 병렬운전에 따른 계통보호와 같은 기술적인 문제들이 비교적 복잡하고 어려워 전력계통 구성에서 기기선정 및 운전이 이르기까지 이의 체계적이고 논리적 검토가 필요하다.

자가발전기가 없는 산업체 전력계통도 구성의 복잡화로 인하여 전기적 사고 발생우려가 높고 전력계통 규모확대 및 설비의 대형화 경향이 있어 사고발생시 대형 사고로 진행되는 사례가 많아 공장전체를 정전시키는 경우도 있어 전력설비 손상에 따른 손실은 물론 생산공정 완전 정지로 인하여 이를 복구하기까지 많은 경제적 손실을 유발하는 경우도 있다.

최근에는 산업체 전력계통에 마이크로프로세서 또는 전자장치가 부가된 다양한 전력설비가 채택되고 있는 추세여서 전력품질 상태에 따라 이들 전력설비가 매우 민감하게 반응한다.

즉 전기적 사고, 뇌격은 물론 전기적 동요 및 고조파와 같은 전력품질 저하로 인하여 컴퓨터, 산업공정제어기, 에너지관리시스템 및 안전제어시스템과 같은 설비의 손상은 물론 데이터 상실 또는 기능 장애 등이 발생한다.

최적의 전력계통 계획, 설계 및 운용을 위해서는 초기 단계부터 평가, 계통의 장래성, 계통의 신뢰성, 안정성 및 경제성 등을 조사하기 위한 기술검토, 즉 전력계통 해석이 필요하다.

오늘날 많은 산업체 전력계통에서 전력품질 저하로 인하여 전기적 고장이 발생되고 있다.

대부분의 전력품질 문제는 안정도 해석, 과도현상 해석 및 고조파 해석과 같은 전력계통 해석 소프트웨어로 이의 발생 요인을 분석할 수 있으며 이들 소프트웨어를 활용하여 문제 해결의 방안을 모의하여 적정 대책을 수립할 수 있다.

## 2. 전력계통 해석 소프트웨어

전력계통을 모의하여 전력계통 또는 전력설비의 정적 및 동적인 특성을 해석 및 분석하고 전력계통의 이상 현상을 모의하여 전력계통 구성 및 운용의 최적화 방안을 찾아내며 전력설비를 감시 보호하는 보호계전기의 최적 정정치를 도출해 내는 전력계통 해석 및 분석 소프트웨어들은 다음과 같은 것들이 있다.

- 조류계산(Load Flow Analysis)
- 고장전류계산(Fault Analysis Calculations)
- 안정도 해석(Transient Stability Analysis)
- 전동기 기동 해석(Motor Starting Analysis)
- 부하차단 해석(Load Shedding Analysis)
- 고조파 해석(Harmonic Analysis)
- 변전소 접지 분석(Substation Grounding)
- 케이블열 해석(Cable Thermal Analysis)
- 과도현상 해석(Transient Analysis)
- 보호계전기 협조(Protective Device Coordination)

### 가. 조류계산

조류계산이란 전력계통의 전력 발생에서 소비에 이르기까지 각 전력설비의 전압이나 전류분포가 어떻게 되는 것인가를 계산하는 일련의 정태계통 해석이다. 따라서 운전 가능한 여러 가지 전력계통 구성 형태를 고려하여 전력계통 계획 및 운용시 전력조류가 각 전력설비의 안전 운전 허용 범위인가와 각 모선 전압이 규정 범위 이내인가를 검토할 수 있게 하며 조류계산 결과는 고장전류 계산, 과도안정도 해석 및 고조파 해석의 기초자료로 활용된다.

조류계산은 비선형 연립방정식 형태로 표현되는 전력방정식 해를 구하는 것이다.

즉 정상상태에서의 계통을 평형이라 가정하여 3상 회로를 정상분 대칭회로로 표현한 후 이를  $Y_{bus}$  행렬로 구성하고 전력조류계산을 수행하게 되며  $n$ 개의 모선으로 이루어져 있다고 가정할 때의 표현식은 다음 식 (1)과 같으며 전력조류계산을 원하는 특정모선을  $p$ 라고할 때  $p$ 모선에서의 전력  $W_p$ 를 구하는 식은 다음 식 (2)와 같다.

$$I_{bus} = Y_{bus} V_{bus} \quad \dots \dots (1)$$

여기서,  $I_{bus}, V_{bus} : n \times 1$  벡터

$Y_{bus} : n \times n$  행렬이다.

$$W_p = P_p + jQ_p = E_p I_p^*$$



$$= E_p \sum_{q=1}^n Y_{pq}^* E_q^* \dots \dots (2)$$

여기서,  $P_p$ 와  $Q_p$ 는 다음과 같다.

$$P_p = E_p \sum_{q=1}^n [(G_{pq} \cos \theta_{pq} + B_{pq} \sin \theta_{pq}) E_q]$$

$$Q_p = E_p \sum_{q=1}^n [(G_{pq} \sin \theta_{pq} + B_{pq} \cos \theta_{pq}) E_q]$$

조류계산은 각 모선에 있어서 정해지지 않은 2개의 변수

- ① P-Q 모선은  $V, \theta$
- ② P-|E| 모선은  $Q, \theta$
- ③ Slack 모선은 P, Q를 구하는 것이다.

조류계산방법으로는 여러 방법이 개발되어 있지만 그 중에서도

- ① 선형연립방정식을 푸는 유력한 해법인 가우스·자이델(Gauss-Seidel)반복계산법
- ② 비선형문제의 전형적 해법인 뉴턴-랩슨(Newton-Raphson)법

두 가지가 널리 쓰이고 있다.

조류계산은 검토 대상 전력계통의 전력손실 최소화, 과부하 해소 및 전압 적정 조건을 위한 변압기 최적 탭 선정은 물론 최적의 안정된 전력계통 구성 및 운용 방안을 찾아내는데 이용된다. 조류계산으로 역률 개선을 위한 전력콘덴서의 적정 위치와 이의 용량을 결정하게 된다.

전력조류계산 결과는 고조파해석 소프트웨어의 기본 자료로 활용될 수 있으며 자가발전기를 보유한 전력계통에 필요한 부하차단 및 안정도 해석의 입력자료로 조류계산 결과가 이용된다. 조류계산 결과 보고서에는 각 모선 전압 목록, 선로 및 변압기와 같은 전력설비 조류 및 설비별 또는 종합된 전력손실 등이 포함된다. 최근의 전력조류계산 소프트웨어는 전력계통 단선도를 도해하고 단선도상에 조류계산 결과를 표시하여 이용자의 판독을 용이하게 지원한다.

### 나. 고장전류 계산

고장전류 계산은 전기 고장시 각 전력설비에 나타나는 전압, 전류 또는 고장전력을 구하는 것이다. 고장전류 계산은 전기고장 상태를 정확히 파악하여 최적 전력계통 운용이 가능하도록 각 전력설비의 전기적, 기계적 및 열적 강도가 고려된 전력계통 구성의 기초 자료로 이용된다.

전력계통에서는 고장전류 계산에 따라 접지방안이 선택되고 회로차단기의 차단용량을 결정하고 아울러 보호계전 방식이 정하여 진다.

보호계전기는 전력계통의 고장상태를 감지하고 고장상태에 따라 신속하고 정확히 건전하지 못한 전력계통을 분리하도록 관련 차단기를 차단하므로 정전범위 축소와 사고파급을 억제하여 전력설비 고장억제와 함께 신뢰도 높은 전력공급이 이루어지게 하는데 그 설치 목적이 있다.

따라서 고장전류 계산의 결과에 따라 보호계전기 정정을 결정해야 한다.

그림 1은 대표적인 단락고장 전류 형태를 나타낸 것이다.

즉 고장 초기에 직류성분이 포함되고 고장 전류는 초기 차과도임피던스에 의해 가장 큰 전류가 나타나고 시간이 지속됨에 따라 과도 임피던스 그리고 동기임피던스에 의해 고장전류가 점진적으로 감소하게 된다.

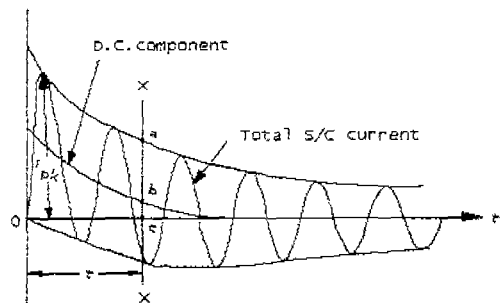


그림 1 대표적인 단락고장 전류 형태

따라서 고장전류는 그 사용 목적에 따라 고장 발생으로부터 어느 시점에 위치한 전류 값을 취하는 것이 적정한가를 판단하여 계산하게 된다.

일반적으로 산업계 전력계통 해석 및 분석에 사용되는 고장전류는 다음과 같이 3가지로 분류될 수 있다.

- 퓨즈와 차단기를 위한 초기 사이클(Momentary) 책무
- 고압차단기를 위한 인터럽트(Interrupt)책무
- 한시 계전기를 위한 단락 전류

이들 고장전류 계산은 검토 대상인 전력계통의 회전기기 임피던스를 제외하면 동일하다.

즉 한시계전기(Time-Delayed Relay)정정에 필요한 고장 전류계산은 발전기의 경우 과도임피던스를 사용하고 전동기로부터 유입되는 고장전류는 생략한다. 그러나 순시형 계전기 정정에는 초기 사이클 책무(Momentary duties)가 적용된다.

초기 사이클 책무를 위한 대칭 단락고장전류 계산은

$$I_{scsym} = \frac{E_{pu}}{Z_{pu}} \times I_{base} \dots\dots (3)$$

여기서,

- $I_{scsym}$  : 삼상대칭 초기사이클 고장 전류 (Symmetrical Rms Current)
- $Z_{pu}$  : 고장점 등가 임피던스(P.U.)
- $E_{pu}$  : 고장전 고장점 전압
- $I_{base}$  : 기준전류

만일 차단기 차단용량이 비대칭 고장전류 (Asymmetrical Rms Current)일 경우는 대칭 고장전류에 배율을 곱하여 구한다. 즉

$$I_{sctot} = \frac{E_{pu}}{X_{pu}} \times 1.6 \times I_{base} \dots\dots (4)$$

여기서,

$I_{sctot}$  : 삼상비대칭 초기사이클 고장전류 (Asymmetrical Rms Current) 인터럽트 책무

를 위한 단락 고장계산은 차단기 차단시간(8, 5, 3 및 2 Hz)에 따라 그리고 고장점의 X/R비와 고장점이 발전기 단자와의 인접여부에 따라 배율이 다르게 계산된다.

인터럽트 책무인 대칭 인터럽트 용량 (Symmetrical Interrupting Capability)은

$$= \frac{(Rated I_{sc}) \times (Max I_{mum} E)}{Operating E} \dots\dots (5)$$

고장전류 계산 결과를 이용하여 전력계통의 차단기 차단내력, 모선 및 전력케이블의 단시간 정격 등이 결정하게 된다.

만일 고장전류가 차단기 차단내력을 초과하게 되면 고장발생시 고장전류를 안전하게 차단할 수 없게되어 차단기 소손은 물론 사고 파급의 우려가 있으므로 전력계통 고장전류 저감 대책인 계통분리 또는 직렬리액터(Current Limiting Reactor) 설치와 같은 방안이 강구되어야 한다.

최근에는 전력계통의 규모확대로 인하여 전력계통 등가 임피던스가 점진적으로 감소되는 추세이며 이로 인하여 단락고장 전류가 점차 증대되고 있어 차단기 선정시 차단기 차단내력은 물론 과도회복전압(Transient Recovery Voltage)도 검토되어야 한다. 과도회복전압 해석에는 과도현상 해석 소프트웨어가 이용되고 있다.

### 다. 안정도 해석

전력계통에 연결된 발전기가 동기 운전을 하기 위해서는 모든 발전기가 같은 전기 속도로 회전해야 하며 어떤 원인으로 발전기의 회전자 위치가 처음 위치에서 앞서거나 또는 뒤졌을 경우 이것을 먼저 있는 위치로 회복시키는 힘이 작용하지 않으면 안된다.

전력계통에서는 끊임없는 부하 변동이 발생하고 또는 전기 사고 등에 의하여 전력의 생산과 수요간에 불균형이 발생하게 되어 이로 인하여 발전기 상차각이 변하게 되는데 이의

상태변화 여하에 따라서는 동기운전이 깨어질 수도 있게 된다.

즉 전기적 외란의 크기, 발전기 특성 또는 전력계통 구성상태에 따라 전력계통의 안정도가 결정된다.

안정도 해석은 주어진 전력계통에서 발생할 수 있는 전기적 외란, 즉 단락 또는 지락사고, 발전기 탈락, 연계선로 분리 사고 등에서 모션 또는 발전기의 전압, 주파수, 상차각, 유효전력, 무효전력 및 여자전압 등 전력계통의 상태변화를 시뮬레이션하여 안정도를 판별하게 된다.

전력계통에는 다수의 동기기나 부하 등이 포함되어 있으며 이들을 독립적으로 취급해서 안정도를 다루는 것은 불가능하다.

따라서 전력계통의 구성, 발전기 특성, 자동발전제어기 특성, 연계 전력계통 특성 및 전력조류 등이 포함된 전력계통 운동방정식을 만들어 여기에 외란을 모의하여 단계별 운동방정식을 풀어서 전력계통을 구성하고 있는 각 전력설비의 동적인 특성을 해석하는 것이 과도안정도 해석이다.

발전기에는 응답 속도가 빠른 전압 조정 장

치인 여자기와 터빈의 기계적 입력을 조절하는 조속기가 설치되어 있으며 발전기 자신뿐 아니라 발전기가 연결되어 있는 외부계통의 상태변화에 따라서 이들 제어장치가 응답하게 된다.

그림 2는 화력발전소의 제어계통인 보일러 연소제어, 터빈의 조속기 및 발전기의 여자기 구성을 나타낸 것이다.

안정도 해석은 고장 발생 및 제거, 선로 개폐 및 재폐로, 부하차단, 발전기 탈락 및 전동기 기동 상태 등을 상세히 모의 할 수 있으며 전력계통 보호계전 방식 적용에 필요한 저전압계전기, 저주파수계전기 및 임피던스계전기 등을 모의할 수 있다.

안정도 해석 소프트웨어를 이용하여 대형전동기 기동모의, 부하차단 모의 등을 할 수 있으며 이를 이용하여 최적의 부하차단 로직 개발 및 선정을 하게 된다.

보호계전기 정정에 필요한 한계 단락 및 지락 고장 제거시간인 임계고장제거시간(Critical Fault Clear Time)도 안정도 해석으로부터 도출해 낼 수 있다.

➡ 다음호에 계속 됩니다

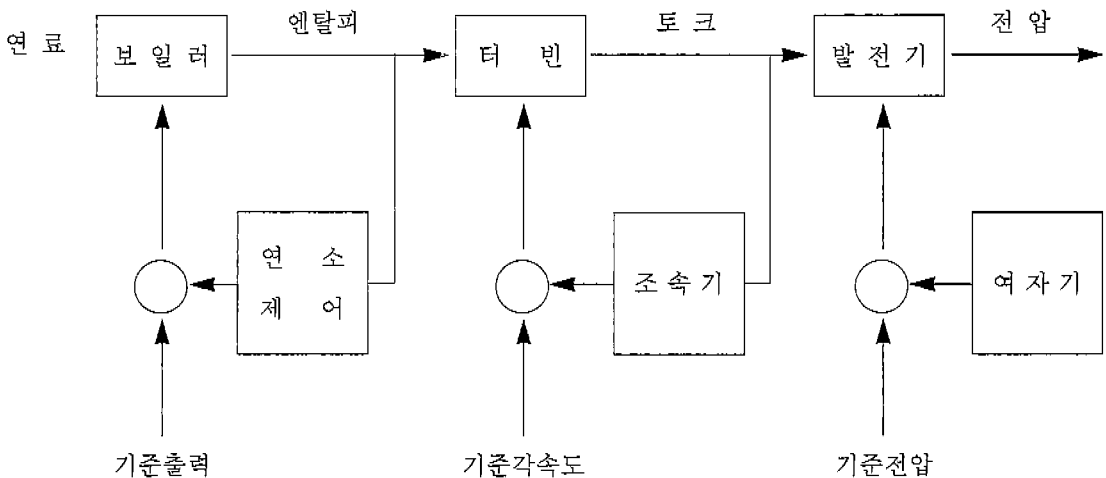


그림 2 발전기 제어 시스템의 개요도