

3상 고장전류 계산 및 해석용 소프트웨어 개발

정대원
호남대학교 전기공학부

Software Development for 3-phase Short Circuit Calculation and Analysis

Dae-Won Chung
Electrical Dept of Honam University

Abstract - 전기설비설계에 직접 활용할 수 있고, 초보자도 쉽게 사용할 수 있는 3상 단락전류 계산용 프로그램을 개발하였다. 산업전기설비에서 차단기는 단락사고를 비롯한 사고전류가 부하로 유입하거나 과전류가 유입시 이를 신속하게 차단하여 안전하고 신뢰성 있는 전기설비의 사용을 보장해 준다. 기존에는 수계산에 의해 수행되던 계산을 정확하고 표준화된 계산이 가능한 전산 소프트웨어를 개발함으로써 보다 편리하게 설계할 수 있게 하였다. 개발된 프로그램은 기존의 설계방식과 비교하여 보다 정확한 설계임을 입증하였으며, 사용자가 쉽게 사용할 수 있도록 GUI화면으로 구성된 점이 특징이다. 출력 자료는 사용자의 필요에 따라 다양하게 출력할 수 있어 전산화의 이점을 최대한 살렸다.

1. 서 론

산업전기설비에서 적절한 차단용량 산정은 안전한 전기 사용과 신뢰성 있는 전기공급을 보장한다. 이런 의미에서 고장전류계산은 전기설비설계에서 빼놓을 수 없는 중요한 설계과제이다. 그러나, 설계시 전력계통으로부터 유입되는 전원의 평소에는 부하로 작용하던 회전기가 사고시에는 전원역할을 함으로써 계통 임피던스를 사고형태와 장소별로 새로운 임피던스 구조로 변환하여 계산하여야 하기 때문에 계산과정이 다소 복잡하여 계산결과의 타당성에 대한 의문이 늘 제기되어 보다 신뢰성이 있고 표준화된 설계가 요구되었다. 또한, 설계시간과 노동경비를 절감하여 인건비를 줄이려는 산업계의 요구에 부응하여 새로운 전산 프로그램을 개발하게 되었다. 개발된 소프트웨어의 초점은 우선 사용자가 편리하게 사용할 수 있고 적용규격과 설계면서 기준에 수행하는 방식과 큰 차이가 나지 않도록 해야 하는 점과 현실적으로 타당한 설계가 되어야 한다는 점이었다. 즉, 전산 프로그램사용에 대한 깊은 사전지식이나 경험이 없어도 쉽게 사용할 수 있도록 화면을 Window상의 Graphic-User Interface(GUI)를 사용하여 구성하였고, 사용자가 필요한 데이터만 입력하면 해당 계산의 결과를 짧은 시간 내에 얻을 수 있고 사고전류의 과도현상을 분석도 가능하다. 관련 계산수식과 자료 데이터는 산업계에서 널리 활용되고 있는 문헌자료[1,2,3]를 활용하였으며, 전산프로그램을 사용한 계산결과와 수계산의 결과를 상호 비교하여 개발된 프로그램의 정확성과 유용성을 입증하였다.

2. 3상 단락 고장전류의 계산

2.1 개요

3상 단락전류는 산업용 전력설비의 단락용량을 계산하여 차단기의 차단용량산정과 각종 전력기기의 지지대의 구조계산에 주로 이용된다. 그러나, 3상단락전류의 계산은 전압레벨이나 계통규모에 제한 없이 모든 전압레벨과 모든 계통을 대상으로 계산할 수 있도록 설계되어야 하고 단락시 전류공급원이 단락형태에 따라 다양하게 변한다. 따라서, 본 계산프로그램에서는 이점이 특별히 고려되어야 한다.

2.2 Per Unit 계산법

차단기는 전기사고시 최대전류를 차단할 수 있어야 하므로 계산은 최대 단락전류인 3상 단락전류를 구한다. 또한, 각상의 전류를 영상, 정상, 역상분으로 분해하면, 3상 단락시에는 정상분전류만이 흐르고 영상분과 역상분의 전류는 흐르지 않으므로 모든 선로 요소의 정상분 임피던스만을 고려하면 된다. 그리하여, 선로 및 계통 임피던스에서는 정상분만이 실제 설계에서 고려된다. 3상 단락전류 계산법으로 MAV법, Per Unit

Impedance법이 있으나, MVA법은 AC, DC 감쇄를 고려한 X/R 정정팩터(Correction Factor)를 구하기 어렵기 때문에 주로 Per Unit Impedance법을 사용한다. 일반적으로 기준 MVA에 대한 Per Unit 임피던스는 다음 수식으로 표현된다.

$$\%Z = \frac{\Omega \times kVA_{base}}{1000 \times (kVA)^2} \quad (1)$$

$$\text{혹은, } p.u.Z = \frac{\%Z}{100} \quad (2)$$

이 p.u.Z에 대한 대칭단락전류는 다음 수식으로 표현된다.

$$p.u.I = \frac{E}{p.u.Z} = \frac{MVA_{base}}{p.u.Z \times \sqrt{3} \times kV} \quad (kA) \quad (3)$$

이 방법에 의한 고장전류 계산순서는 다음과 같다.

- ① 전기단선도(single Line Diagram) 작성
- ② 기준 MVA Per Unit Impedance 계산
- ③ Impedance Diagram 작성
- ④ 각 고장점에서 본 등가의 임피던스 계산
- ⑤ $I_s = E_s/Z_s$ 에 의한 단락전류 계산이다.

이 계산과정의 문제는 각 선로 소자들의 정상분 임피던스를 어떻게 반영해야 하는 것이다. 이를 위해 우선 전력회사의 전력공급선로의 단락용량을 조사하여야 한다. 또한, 전력용 기기와 소자들의 임피던스, 리액턴스, 저항과 변압기 결선방식등을 조사하여야 한다. 따라서, 이러한 데이터들은 기본적으로 사용자(설계자)가 알아야 하므로 본 프로그램에서도 입력데이터로 주어진다. 그리하여, 본 단락전류 계산 프로그램은 각 선로 소자들(예, 변압기, 선로, 리액터등)의 % 임피던스와 기준 MVA를 입력하면 자동적으로 Per Unit Impedance로 변환된다.

2.3 Per Unit 임피던스 데이터 선정

3상 단락전류 계산을 위해서는 기본적으로 선로상의 모든 임피던스값을 필요로 하므로 각 선로 소자별 임피던스 값은 다음과 같이 고려되었다.

- ① 전력계통의 임피던스
전력계통의 단락 임피던스는 한전으로부터 관련 선로별 임피던스 데이터를 MVA기준으로 받을 수 있으므로 단락 임피던스는 다음과 같이 변환한다.

$$X_s = \frac{100MVA}{Utility Short Circuit MVA} \quad (4)$$

$$R_s = X_s \div (X/R_{Ratio})$$

- ② 변압기

$$X_T = \frac{100MVA}{MVA_{TR}} \times \frac{\%X}{100} \quad (5)$$

변압기의 결선방식(Y-Y, Δ-Δ, Δ-Y)에 따라 Phase Shifting이 다르게 일어나기 때문에 반드시 저압, 고압을 구분하여 결선방식을 지정한다.

- ③ 회전기기

$$X_{MC} = X_d'' \quad (6)$$

정상분 임피던스만 고려하면 되므로 동기발전기, 동기전동기 및 대형 유도전동기(단, 소형 유도전동기(30kW 미만)는 무시함)의 차파도 리액턴스만을 고려하면 된다.

- ④ 케이블 및 선로

수식 (1)과 (2)를 이용하여 선로 및 케이블의 실제값을 Per Unit값으로 변환하여 선로의 정상분 임피던스로 사용한다.

2.4 네트워크 전압 방정식

Bus 임피던스, Bus 전압, Bus 전류로 구성되는 선로 방정식은 Matrix Method를 이용하여 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ \vdots \\ E_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & \cdots & Z_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{n1} & \cdots & Z_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \end{pmatrix} \quad (7)$$

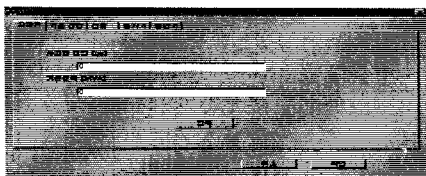
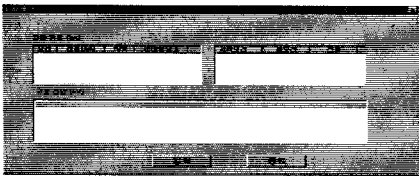
여기서, $Z_{kk} = \frac{E_k}{I_k}$ ($I_i=0, i \neq k$), $Z_{ik} = \frac{E_i}{I_k}$ ($I_i=0, i \neq k$)로서, k-Bus의 단락전류와 모션전압은 다음과 같이 계산된다.

$$I_k = \frac{E_k}{Z_{kk}} \quad (8)$$

$$E_i = E_k \left(1 - \frac{Z_{ik}}{Z_{kk}}\right) \quad (9)$$

$$I_i = \frac{E_i - E_i}{Z_{Li}} = \frac{E_k}{Z_{Li}} \cdot \frac{Z_{ik} - Z_{ik}}{Z_{kk}} \quad (10)$$

k-Bus에서 3상단락 사고시 단락용량은 $MVA = 100/Z_{kk}$ 이며, 이때 단락전류는 $I_s (kA) = 100/(\sqrt{3} \times V_k \times Z_{kk})$ 로부터 계산된다. 여기서, V_k 는 k-Bus의 정격전압, Z_{Li} 은 선로 임피던스이다. 아래 그림 1에서 3상 단락전류 계산용 프로그램의 입출력 화면을 보이고 있다.



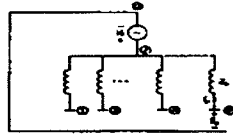
(그림 1) 고장전류 계산용 화면의 예

2.5 Z_{bus} 매트릭스 구성 알고리즘

선로고장시 동기기와 유도기기의 회전기기는 고장전류를 제공하는 새로운 하나의 전압원 역할을 하게 되고, 전압원인 각 모션에서 고장점과의 연결조건에 따라 Network에 고장점을 중심으로 새로운 임피던스로 접속되어 새로운 매트릭스를 구성하게 된다. 즉, 새로이 추가되는 Element의 접속형태에 따라 대개 다음 4가지 형태로 구분되고, 이 형태별로 구성되는 새로운 임피던스 매트릭스를 형성하여 계산해야 한다.

① Type 1 : 기준모션에 새로운 모션(Z_{bus})이 추가된 경우로써 (그림 2 참조) 기존 Z_{bus} 매트릭스에 diagonal 항이 추가되는 형태의 구조를 이룬다. 만약 추가된 모션 p에서 사고가 발생시에는 $E_p=0$ 이 되고, 사고전류 $I_p = V_F/Z_b$ 가 되어 새로 추가된 모션은 기존의 모션에 아무런 영향을 미치지 않는다. 결과적으로 Z_{bus} 매트릭스 diagonal 항이 추가된 셈이다.

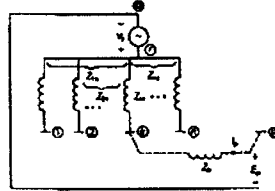
$$\begin{pmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_F - E_1 \\ V_F - E_2 \\ \vdots \\ V_F - E_n \\ V_F - E_p \end{pmatrix} \quad (11)$$



(그림 2) Type 1형 기준모션에 Z_{bus} 이 추가된 경우

② Type 2 : 기존 k 모션으로부터 새로운 모션 p에 사이에 Z_{bus} 가 추가되는 경우로써 (그림 3 참조) 기존 Z_{bus} 매트릭스에 행(Row)과 열(Column)이 추가되는 구조를 이룬다.

$$\begin{pmatrix} Z_{bus(oid)} & & & \\ & Z_{2k} & & \\ & \vdots & & \\ & Z_{nk} & & \\ Z_{1k} & \cdots & Z_{nk} & Z_{kk} + Z_b \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_F - E_1 \\ V_F - E_2 \\ \vdots \\ V_F - E_n \\ V_F - E_p \end{pmatrix} \quad (12)$$



(그림 3) Type 2형 k 모션에 Z_{bus} 가 추가된 경우

식 (12)에서 새로운 행과 열이 생긴 셈이다. 만약 새로 생긴 모션에서 사고가 발생시에는 $E_p=0$ 이고 $I_p = V_F/(Z_{kk} + Z_b)$ 이다.

③ Type 3 : 기준모션 r으로부터 기존 모션 k에 추가되는 경우로써 (그림 4 참조) 새로운 모션의 Z_{bus} 는 다음과 같이 얻어진다. 위 Type 2와 같이 새로운 모션 p와 k 모션 사이를 Z_{bus} 로 일시적으로 연결한다. 그리고 난 후에 p 모션을 기준 모션 r에 단락시킨다. 그렇게 함으로써 $V_F - E_p = 0$ 과 I_p 를 소거하여 원하는 형태의 결과를 얻을 수가 있다. 즉,

$$Z_{bus(oid)} I + Z_{col} I_p = V_F - E = 0 \quad (13)$$

을 얻는다.

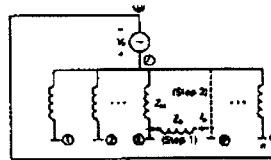
$$\text{여기서, } Z_{col} = \begin{bmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ \vdots \\ Z_{nk} \end{bmatrix}, I = \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix}, (V_F - E) = \begin{bmatrix} V_F - E_1 \\ V_F - E_2 \\ \vdots \\ V_F - E_n \end{bmatrix}$$

이다. 식 (13)을 I_p 에 대해서 정리하면 식 (14)를 얻는다.

$$\left[Z_{bus(oid)} - \frac{Z_{col} Z_{col}^T}{(Z_{kk} + Z_b)} \right] I = V_F - E \quad (14)$$

따라서, 새로운 $Z_{bus(new)}$ 를 구하면 식(15)가 된다.

$$Z_{bus(new)} = Z_{bus(oid)} - \frac{1}{(Z_{kk} + Z_b)} \begin{bmatrix} Z_{1k} \\ Z_{2k} \\ \vdots \\ Z_{nk} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Z_{1k} & Z_{2k} & \cdots & Z_{nk} \end{bmatrix} \quad (15)$$



(그림 4) Type 3형 기준모션

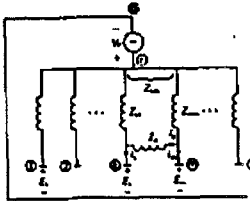
과 k모션 사이에 Z_{bus} 가 추가된 경우

$$\begin{pmatrix} & & & (Z_{1k} - Z_{1m}) \\ & & & (Z_{2k} - Z_{2m}) \\ & & & \vdots \\ & & & (Z_{nk} - Z_{nm}) \\ (Z_{1k} - Z_{1m}) & \cdots & (Z_{nk} - Z_{nm}) & (Z_b + Z_{kk} + Z_{mm} - 2Z_{km}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_F - E_1 \\ V_F - E_2 \\ \vdots \\ V_F - E_n \\ 0 \end{pmatrix} \quad (16)$$

$$Z_{bus(new)} - Z_{bus(oid)} - \frac{1}{(Z_b + Z_{1k} + Z_{mm} - 2Z_{km})} \begin{bmatrix} Z_{1k} - Z_{1m} \\ Z_{2k} - Z_{2m} \\ \vdots \\ Z_{nk} - Z_{nm} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} (Z_{1k} - Z_{1m}) & \cdots & (Z_{nk} - Z_{nm}) \end{bmatrix} \quad (17)$$

④ Type 4 : 기존 k 모선과 인접한 m 모선 사이에 Z_{bus} 가 추가된 형태라서, 이 경우에는 $(I_k + I_b)$ 전류가 k 모선으로 흐르고, $(I_m - I_b)$ 가 m 지선으로 흐른다. 1번 모선의 전압은 $Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 + \dots + Z_{1k}(I_k + I_b) + \dots + Z_{1m}(I_m - I_b) + \dots + Z_{1n}I_n = V_F - E_1$

이 고 k 모선은 $Z_{1k}I_1 + Z_{2k}I_2 + \dots + Z_{kk}(I_k + I_b) + \dots + Z_{km}(I_m - I_b) + \dots + Z_{kn}I_n = V_F - E_k$ 이 되어, $Z_b I_b = E_k - E_m$ 이므로 결국 결과식 (16)을 얻는다. 그리하여, 새로운 임피던스는 식 (17)과 같이 구하여 진다.

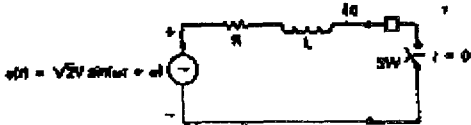


(그림 5) Type 4형 k 모선과

m 모선 사이에 Z_{bus} 가 추가된 경우

2.6 사고전류의 과도 해석

위 고장전류 계산은 3상 단락 전류의 대칭분 성분으로 차단기 용량산정을 위해서는 DC 성분을 포함한 비대칭 전류를 계산하여야 한다. 이는 선로 임피던스의 적절한 X/R 비율로써 결정되어지는데, 그 비대칭 전류의 감쇄 정도를 분석하기 위하여 과도 기간중에 발생하는 사고 전류의 크기 변화를 해석할 해석용 프로그램도 함께 개발하였다. 이는 R-L 직렬회로에 구형파함수를 인가함으로써 구해지는데 회로 모델과 수식은 다음과 같다.



(그림 6) 사고시 과도현상 해석용 모델

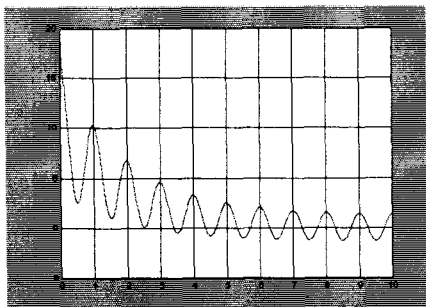
즉, 단락시에는 스위치를 닫는 경우와 동일하므로 회로방정식은 식 (18)로 주어지고,

$$L \frac{di(t)}{dt} + Ri(t) = \sqrt{2} V \sin \omega t, \quad t \geq 0 \quad (18)$$

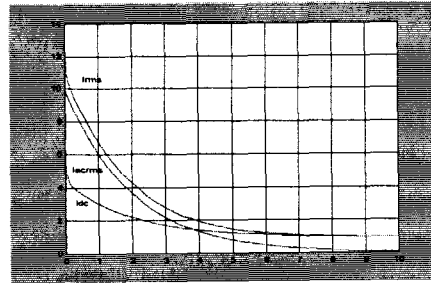
이 미분방정식을 풀면 (19)와 같은 해를 얻는다.

$$i(t) = i_{ac}(t) + i_{dc}(t) = \frac{\sqrt{2}V}{Z} [\sin(\omega t + \theta) - \sin \theta e^{-t/\tau}] \quad (19)$$

즉, 직류분과 교류분으로 분해되는데, 직류분은 감쇄정도를 결정하며, 실제 사고전류는 이 두 성분의 합으로 나타난다. 아래 그림 (7), (8)에서 위 고장전류의 시뮬레이션한 결과를 보이고 있다. 차단기용량은 당연히 이 비대칭분분의 최고 전류를 차단할 수 있는 용량으로 선정되어야 한다. 이 과도 전류의 크기는 계통선로정수의 R/X 비율에 의한 비대칭 사고전류의 크기가 결정되고, 이를 바탕으로 적절한 차단기 용량산정이 완료되어 이 결과를 바탕으로 단락용량별 사용 가능한 차단기 형식과 플레임을 결정하는데 사용된다.



(그림 7) 고장전류의 과도현상과 크기 변화



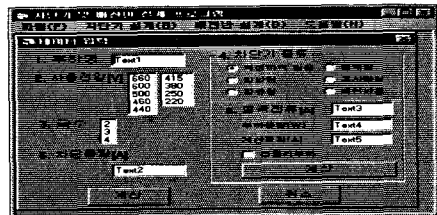
(그림 8) 고장전류의 분석(직류분, 대칭분, 비대칭분)

3.2 작업화면의 구성

화면구성은 입력과 출력을 하나의 화면으로 구성하여 사용자가 쉽게 입력력의 데이터를 확인하고 사용할 수 있도록 설계하였다. 또한, 계산 결과의 출력은 입력된 값과 계산된 값을 모두 출력하는 방법과, 출력결과를 차단기 종류별/size별 수량만을 출력하여 최종 물량 산정에 직접 사용할 수 있도록 고려했다. 그림 (9), (10)에서 메뉴화면과 입출력 데이터 화면의 예를 보여주고 있다.



(그림 9) 기본 메뉴 화면



(그림 10) 차단기 선택 데이터 입력 화면

4. 設計計算의 '예'

설계계산의 예를 그림 10의 화면에서 보이고 있으며 다양한 형태의 출력데이터를 얻을 수 있다. 또한, 기존의 표준화된 수계산에 의한 방법보다 비하여 계산오차가 발생하지 않아 정확성과 신뢰성을 확인하였으며 프로그램 사용에 대한 예비지식이 없는 초보자도 사용 가능하므로 편의성과 생산성을 높인다.

6. 結論

본 프로그램의 개발로 설계과정의 표준화와 설계의 정확성 및 소요시간을 단축할 수 있었다. 실제 설계에서 직간접적으로 널리 활용되고 이용될 수 있는 유용한 프로그램임이 확인되어 전기설비 설계의 전산화에 더한층 이바지하여 다음의 결론을 얻을 수 있었다.

- 정확하고 표준화된 설계를 통해 전기설비설계에서 안전성과 신뢰성의 확보에 기여하였으며,
- 설계 소요시간 단축을 통해서 인건비를 절감하고, 다양한 형태의 데이터 출력으로 전산 프로그램의 효율성을 입증하였으며,
- 산업체에 전문 소프트웨어 개발과 활성화에 기여하였다.

參考文獻

[1]. "電氣設備技術計算 핸드북" 技多利, 1983
 [2]. 국내 전기관계법규집
 [3]. Irwin Lazer, "Electrical Systems Analysis and Design for Industrial Plants", McGraw-Hill Co., 1980.