IEC 방식을 이용한 고장계산 소프트웨어 개발에 관한 연구

윤상윤*, 이남호
(주)LG산전 전력연구소

A Study on the Development of Fault Calculation S/W using IEC Standard

Yun Sang-Yun, Lee Nam-Ho
Electrotechnology R&D Center of LGIS

Abstract - 본 논문은 계통의 고장해석을 위한 소프트웨어의 개발에 대해 다루었다. 일반적으로 고장 계산방식은 IEC 및 IEEE 방식으로 나눌 수 있으며 본 논문에서 활용한 IEC 방식은 각 지로 별 고장전류를 계산하여 이를 합산하여 최종적으로 고장점의 전류를 계산하는 방식이다. 계산된 결과는 최대 비대칭 전류, 대칭 전류, 차단 전류, 직류 전류 및 비대칭 차단전류 등으로 나뉘어 지며 보호기기 설정 시 차단시간 및 용량, 투입 용량 등의 결정에 활용된다. Y-Bus 행렬을 이용하여 IEC 고장계산 알고리즘을 구현하였으며 구성된 알고리즘의 검증을 위해 8모선 및 24모선 계통에 대해 사례연구를 수행하였다. 사례연구 결과를 수계산, 본 논문의 소프트웨어 및 상용 소프트웨어의 연산 결과와 비교하였다.

1. 서 론

계통의 단락전류 해석은 보호기기를 비롯한 계통 설비의 선정 및 보호협조 등을 위한 기초적이며 중요한 작업이다. 고장전류 계산 방식은 IEEE와 IEC 방식으로 구분하는 것이 일반적이며 두 방식 각각의 특성이 존재하는 것이 사실이지만 대체적으로 유사한 결과를 낸다고 봐야 한다. IEEE 방식의 경우 계통을 차과도, 과도 및 정상상태 임피던스 군으로 구분하여 각 상태별로 고장계산을 하는 방식이다. IEC 방식은 지로의 고장전류를 합산하여 고장점의 전류를 구하는 방식이나 실제적으로는 IEEE 방식과 마찬가지로 시간대 별로 변화하는 임피던스 군을 이용하여 고장계산을 수행한다. 다만 두 규격에서 적용하는 임피던스 계산방식 상에 차이는 존재한다.
본 논문에서는 IEC 방식에 따른 고장계산 소프트웨어 개발에 대해 다루었다. Ybus 행렬을 이용한 고장계산 소프트웨어를 개발하였으며 예제 계통에 대해 수계산 및 상용소프트웨어와의 비교를 수행하였다.

2. IEC 방식의 고장해석

IEC 방식의 고장해석을 통해 얻으려 하는 전류는 다음 그림과 같이 표현할 수 있다.

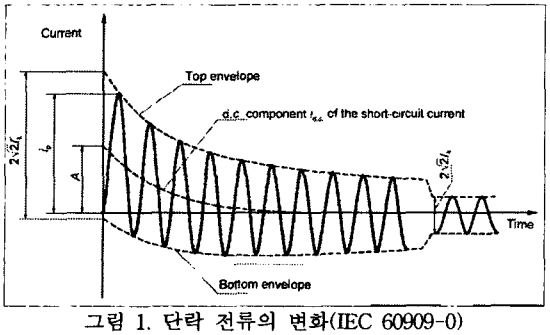


그림 1. 단락 전류의 변화(IEC 60909-0)

그림 1에서 보는 바와 같이 고장전류는 고장 시작점에서 0.5주기 만에 최대(peak)전류를 기록하고 점차적으로 저감하면서 최종적으로 안정적인 정상상태(steady-state) 고장 전류로 된다. 그림 1과 같이 변하는 이유는 발전기와 전동기의 단락전류 기여분의 변화 때문이다. 시간에 따라 변화되는 그림 1의 각종 전류들을 정의하면 다음과 같다.

1)초기 대칭 단락 전류: 0.5주기에서 예상되는 단락전류의 교류 대칭분의 실효치

$$I_k'' = \frac{cU_n}{\sqrt{3}Z_k} = \frac{cU_n}{\sqrt{(3)}\sqrt{(R_k^2 + X_k^2)}} \quad (1)$$

2)최대 단락 전류: 예상되는 단락전류의 최대 순시치

$$I_P = k\sqrt{2}\, I_k'' \quad (k = 1.02 + 0.98e^{-3(R/X)}) \quad (2)$$

3)대칭 단락 차단 전류(symmetrical short-circuit breaking current): 스위칭 장치들의 첫 번째 접점이 분리되는 순간의 단락전류 실효치

$$I_{bsym} = I_k'' \quad (3)$$

4)직류 성분 전류

$$I_{d.c} = \sqrt{2}\, I_k''\, e^{\frac{-2\pi f t_{min}}{X/R}} \quad (4)$$

5) 비대칭 단락 차단 전류

$$I_{basym} = \sqrt{I_{bsym}^2 + I_{d.c}^2} \quad (5)$$

5)정상상태 단락 전류: I_k, 과도현상이 사라진 후에도 남아있는 단락전류의 실효치

식 (1)~(5)에서 볼 수 있듯이 IEC 고장 전류 해석의 기본은 초기 대칭 단락 전류 I_k''와 X/R 값을 계산하는 것이다. 나머지 전류들은 모두 여기에서 계산되는 값이된다. 대칭 단락 차단 전류는 초기 대칭 단락 전류와 계산방식은 동일하나 발생하는 시간대역에 차이가 있다. 즉 초기 대칭 단락 전류는 단락전류의 대칭분 실효치 중 특별히 0.5주기에서 발생하는 것을 의미하고 대칭 단락 차단 전류의 경우 어느 시점에서 보호장치(차단기 등)가 동작하는가에 따라 그 값이 달라진다. 만일 저압 차단기의 경우처럼 0.5주기에 동작하는 보호기기가 있다면 이 경우 대칭 단락 차단 전류 I_{bsym}는 I_k''과 같은 값이 될 것이며 만일 차단시간이 5주기라면 그 시간대에 발생하는 대칭분 단락 전류 크기가 될 것이다.

시간에 따라 I_{bsym}를 변화시키는 요인은 발전기와 전동기와 같은 단락 기여분이 변화하기 때문이다. 발전기와 전동기의 기여분 변화는 μ, q라는 계수를 이용하여 표현된다.

$$\mu = 0.84 + 0.26\, e^{(-0.26\, I_{kG}'')/I_{rG}} \quad (t_{\min} = 0.02s) \quad (6)$$

$$\mu = 0.71 + 0.51\, e^{(-0.30\, I_{kG}'')/I_{rG}} \quad (t_{\min} = 0.05s) \quad (7)$$

$$\mu = 0.62 + 0.72\, e^{(-0.32\, I_{kG}'')/I_{rG}} \quad (t_{\min} = 0.10s) \quad (8)$$

$$\mu = 0.56 + 0.94\, e^{(-0.38\, I_{kG}'')/I_{rG}} \quad (t_{\min} = 0.25s) \quad (9)$$

여기서 I_{kG}''은 발전기 부분의 초기 대칭 단락 전류이며 I_{rG}는 발전기 정격전류이다.

$$q = 1.03 + 0.12\ln(P_{rM}/p) \quad (t = 0.02s) \quad (10)$$

$$q = 0.79 + 0.12\ln(P_{rM}/p) \quad (t = 0.05s) \quad (11)$$

$$q = 0.57 + 0.12\ln(P_{rM}/p) \quad (t = 0.10s) \quad (12)$$

$$q = 0.26 + 0.12\ln(P_{rM}/p) \quad (t = 0.25s) \quad (13)$$

여기서 P_{rM}은 MW단위의 유효전력이며 p는 모터 극수의 쌍수(number of pair)이다.

발전기와 전동기의 단락전류는 위의 계수에 의해 시간에 따라 다음과 같이 변화한다.

-발전기의 경우

$$I_{kG}''(t) = \mu_t I_{kG}'' \quad (14)$$

-전동기의 경우

$$I_{kM}''(t) = (\mu_t \times q_t)\, I_{kM}'' \quad (15)$$

고장 전류는 전압을 임피던스로 나눈값이므로 만일 전류가 반으로 줄었다면(μ, q 계수가 곱해져서) 다른 한편으론 임피던스가 2배가 되었다고 표현할 수도 있을 것이다. 다시 말해서 발전기와 전동기의 임피던스 초기값을 μ 및 q 계수로 나누어 시간 변화에 따른 임피던스로 대체하여 표현할 수 있다는 것이다. 따라서 위의 수식의 μ 및 q 계수는 식 (14) 및 식 (15)와 동일한 효과를 내기 위해 다음과 같이 바꿔 쓸 수 있다.

-발전기의 경우

$$Z_G(t) = (1/\mu_t)\, Z_G'' \quad (16)$$

-전동기의 경우

$$Z_M(t) = (1/(\mu_t \times q_t))\, Z_M'' \quad (17)$$

2. Ybus 행렬을 이용한 IEC 고장해석

고장계산 소프트웨어를 구성하기 위해서는 계통의 구조를 알고리즘 형태로 구성하여 고장계산을 해야만 한다. 이러한 정형화된 구성 방법 중 가장 일반적인 것이 계통 임피던스 구성의 행렬 표현을 이용하는 것이다. 대표적인 방법은 어드미턴스 행렬인 Ybus를 이용하는 방법과 임피던스 행렬인 Zbus를 이용하는 방법이 있다. 본 논문에서는 Ybus 행렬을 이용하였다. 고장계산을 위한 각 단계는 다음과 같이 정리된다.

Step 1)Ybus 행렬 구성
Step 2)역행렬 연산을 통해 Zbus 행렬 구성
Step 3)고장난 모선의 고장전류 계산

- k모선의 고장 발생시 모선에 흐르는 고장전류는

$$I_{kf} = \frac{V_{kf}}{Z_{kk}} \quad (18)$$

여기서 Z_{kk}는 Zbus 행렬에서의 k번째 대각 행렬요소이다. 또한 V_{kf}는 모선 k의 고장전 전압이다.

Step 4)고장나지 않은 모선들의 고장 시 전압 계산

$$V_n = V_{kf}\left(1 - \frac{Z_{nk}}{Z_{kk}}\right)$$

(1 9)

여기서 Z_{nk}는 Zbus 행렬에서의 비 대각 행렬요소이다.

Step 5)고장 모선이외의 선로에 흐르는 고장 전류 계산

$$I_{nm} = \frac{V_n - V_m}{Z_{nm}}$$

(2 0)

여기서 발전기 연결 모선의 경우 V_n은 발전기 단자전압 E_g로 대체한다.

4. 프로그램 구현 및 검증

고장계산을 하기 위해 계통 구성의 탐색 모듈을 프로그램에 탑재하였으며 이를 통해 각 노드의 정보를 수집하였다. 탐색 모듈에 의한 예제 계통의 구조 정보 수집 결과를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 각 노드의 전압, 임피던스, 노드타입(발전기, 전동기, 선로, 변압기 등) 등의 정보가 노드간의 연결 정보와 함께 수집됨을 알 수 있다.

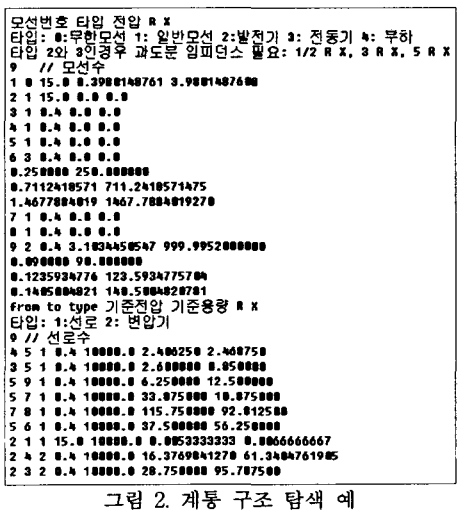
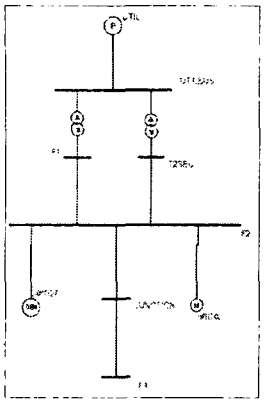
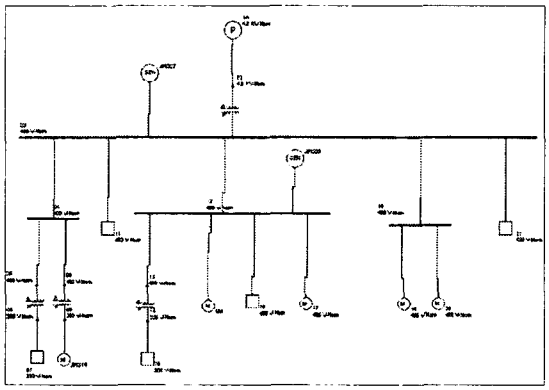


그림 2. 계통 구조 탐색 예

몇 가지 예제 중 그림 3(a)와 그림 3(b)의 계통에 대해 수계산, 본 논문에서 개발한 S/W 및 상용 고장해석 S/W인 EDSA의 동일한 환경에서의 IEC 단락 고장 계산결과 비교를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 그림 3(a)의 계통은 8모선이며 15kV-0.4kV 전압으로 되어 있으며 발전기, 전동기 및 무한모선이 각 1기씩으로 구성되어있다. 그림 3(b)의 예제 계통은 22.9kV-6.6kV-0.48kV의 3단계의 전압으로 되어있으며 총 24모선 중 발전기 2기, 전동기 5기 및 1기 무한모선으로 구성되어 있다.



(a) 8모선 예제 계통



(b) 24모선 예제 계통

그림 3. 예제 계통 단선도

그림 3(a)의 8모선 예제 계통에 대한 0.5주기 및 3주기에 대한 검증 결과를 표 1에 나타내었다.

표 1. 8모선 예제에 대한 검증 결과(t=0.5 및 3cycle)

Node	$I_k^{"}$			I_P		
	수계산	개발SW	EDSA	수계산	개발SW	EDSA
F1	-	50235	50235	-	123989	123988
F2	51183	51183	51183	128517	128517	128516
F3	7095	7095	7095	12095	12095	12095
J#1027	43073	43073	43073	108941	108941	108940
J#1040	20175	20175	20175	44553	44553	44552
Junction	26127	26127	26127	45237	45237	45236
T2sec	-	50087	50087	-	120541	120540
Util	9952	9952	9952	28149	28149	28149
Utilbus	9935	9935	9935	28100	28100	28100
Node	$I_b(t=3cycles)$			$I_{basym}(t=3cycles)$		
	수계산	개발SW	EDSA	수계산	개발SW	EDSA
F1	-	44616	44616	-	44627	44627
F2	44930	44930	44930	44946	44946	44946
F3	6982	6982	6982	6982	6982	6982
J#1027	37253	37253	37253	37264	37264	37264
J#1040	16327	16327	16327	16327	16327	16327
Junction	24589	24589	24589	24589	24589	24589
T2sec	-	44216	44216	-	44220	44220
Util	9871	9871	9871	10097	10097	10097
Utilbus	9854	9854	9854	10070	10070	10070

그림 3(b)의 24모선 예제 계통에 대한 0.5주기에 대한 검증 결과를 표 2에 나타내었다. 표에서 볼 수 있듯이 세 가지 계산결과 모두 거의 동일한 값을 얻음을 알 수 있다. 게다가 수계산 결과에는 역행렬 모듈이 없으므로 이 값을 참값으로 보면 오히려 본 논문에서 제시하는 값이 좀더 높은 정밀도를 가짐을 볼 수 있다.

표 2. 24모선 예제에 대한 검증 결과(t=0.5cycle)

Node	Ik"			Ip		
	수계산	개발SW	EDSA	수계산	개발SW	EDSA
2	-	1377	1377	-	3514	3514
3	3868	3868	3868	10604	10604	10604
4	3866	3866	3866	10594	10594	10594
5	-	3830	3830	-	10011	10011
6	-	6656	6656	-	15200	15199
7	-	6468	6468	-	14137	14137
8	-	3861	3861	-	10467	10467
9	12491	12491	12491	31608	31608	31607
11	-	3795	3795	-	9856	9856
12	3783	3783	3783	9759	9759	9758
13	-	3781	3781	-	9736	9736
14	-	6643	6643	-	15152	15151
15	-	6519	6519	-	14431	14431
16	-	3782	3782	-	9753	9752
17	-	3779	3779	-	9722	9722
18	3856	3856	3856	10537	10537	10537
19	-	3842	3842	-	10297	10297
1A	-	1378	1378	-	3521	3521
20	-	3855	3854	-	10531	10530
21	-	3863	3863	-	10540	10540
J#1306	-	3780	3780	-	9742	9742
J#1307	-	3865	3865	-	10585	10584
J#1314	-	12143	12143	-	30738	30737
LM	-	3771	3771	-	9695	9695

3. 결 론

본 논문에서는 IEC 방식에 의한 고장계산 소프트웨어의 개발에 대해 다루었다. IEEE 방식과 비교하여 IEC 방식은 계수들의 추정식에 차이가 있을 뿐 기본적으로는 거의 유사한 방식임을 알 수 있었으며 Ybus 행렬을 이용하여 고장계산하는 알고리즘을 정리하였다. 개발된 소프트웨어를 사용소프트웨어 및 수계산과 비교해본 결과 상용 툴 그 이상의 정밀도를 확보할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

[1] IEC 60909-0, Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems: Calculation of currents, 2001. 7.

[2] IEC 60909-4, Short-circuit current calculation in three-phase a.c. systems: Examples for the calculation of short-circuit currents, 2000. 7.

[3] Y. Wallach, Calculations and programs for power system networks, Prentice-Hall, 1986.