

송전계통에서 EMTDC를 이용한 고저항 지락사고특성 분석에 관한 연구

박성훈^{*} · 이종범 · 김영한 · 김일동 · 한경남 · 정창호
(원광대) (한전 전력연구원)

A Study on the Characteristic Analysis of High Impedance Fault using EMTDC in Transmission System

Seong-Hun Park^{*} · Jong-Beom Lee · Yeong-Han Kim · Il-Dong Kim · Kyung-Nam Han · Chang-Ho Jung
(Wonkwang University) (KEPRI)

Abstract - This paper describes the characteristic analysis of high impedance fault(HIF) using EMTDC in transmission system. Arcing earth fault has various characteristic and accompanied with HIF which has difficult to quickly detect and clear conventional method. Firstly, we are modelling of actual model system and then actual datas of model system were compared with EMTDC output quantities which were line currents, power flows and loads. Secondly, we propose the new arcing wave methods and analysis the arc characteristic of new arcing wave methods.

1. 서론

본 논문에서는 송전계통에서의 고저항 지락사고 보호를 위한 대책을 수립하기 EMTDC(Electromagnetic Transient DC)를 이용하여 우리나라의 서울지역 계통에서 일부의 실제계통을 모델로 삼고 고저항 상정사고를 내어 어떤 고장현상들이 발생하는 것인가를 분석하고자 한다. 이를 위해 사고계통을 모델링하는 기법을 제시하였으며, 특히 고저항 지락사고시 발생하는 아킹현상을 파악하기 위해 올해 IEEE Power Delivery 1월호에서 EMT 적용을 위해 발표된 HIF(High Impedance Fault)모델(이하 IEEE HIF 모델)[1]에 Variable RLC를 이용한 HIF모델과 IEEE HIF모델을 혼합한 NewArc HIF모델을 제안하여 고저항 지락사고를 시뮬레이션 하였고 아울러 이들 3가지 모델에 대한 아킹사고 현상을 비교 검토하였다.

2. 사고계통 모델구성

2.1 사고계통 모델구성

본 논문에서는 중조류가 흐르는 서울 지역의 A P/O를 중심으로 한 일부 계통을 선정하였다. 그리고 고저항 지락사고는 A P/O와 비교적 거리가 먼 선로인 I S/S - J S/S 선로구간 중 I S/S로부터 J S/S 구간의 70% 지점에서 사고가 발생한 것으로 상정하였다. 한편 모델계통의 송전선로 가운데에는 일부가 OF 케이블 및 CV 케이블과 가공선로가 단일 또는 복합적으로 구성되어 있으며 사고모델계통도는 그림 1과 같다.

2.2 사고모델계통 구성을 위해 필요한 요소

EMTDC 내에서 모델계통을 수립하기 위해 요구되는 요소들은 모선전압, 부하모델, 선로정수 및 Source 임피던스이다.

가. Source 모델의 구성

Source 모델에 필요한 데이터는 Source의 정상, 영상 임피던스로서 PSS/E를 구한 값을 사용하였으며 각 모선의 기준전압은 154kV이지만 실제로 모선에서의 전압은 160kV 부근이므로 대부분 160kV로 가정하였다. 한편 A P/O를 기준모선으로 처리하여 전압위상각은 A P/O를 0도로 하였다.

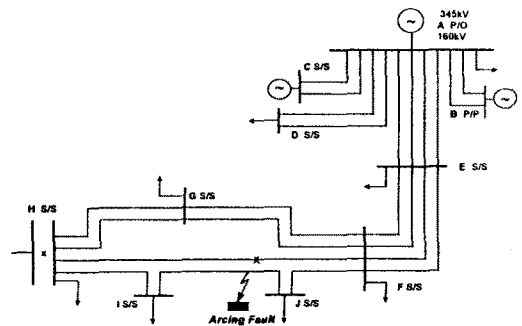


그림 1. 사고모델 계통도

표 1은 사고모델계통에서 사용된 Source 임피던스 및 전압의 크기와 위상각을 나타낸 것이다.

표 1. Source 임피던스 및 전압의 크기와 위상각

Source	정상 임피던스	영상 임피던스	전압의 크기 및 위상각
A P/O	2.4 ∠ 88.67°	3.8 ∠ 86.42°	160 ∠ 0°
B P/P	29 ∠ 88.06°	150.0 ∠ 85.04°	160 ∠ 3.6°
C S/S	5.485 ∠ 83.65°	7.7 ∠ 81.26°	160 ∠ -12.3°

나. 선로정수의 구성

EMTDC에서 사용할 수 있는 NewT/L모델을 사용하여 표현하였으며 송전선의 선로정수를 표현하는데 필요한 데이터가 정상 임피던스(ZI), 정상 어드미턴스(YI), 영상 임피던스(Zo) 및 영상 어드미턴스(Yo)이다. 따라서 기준용량은 100MVA, 기준전압은 154kV 하에서 현재 한국전력공사에서 사용하고 있는 실제 선로정수 $\%Z$ 를 $Z[\Omega]$ 로 환산하여 구하였다. 식(1), (2)는 $\%Z$, $\%Y$ 를 $Z[\Omega]$ 과 $[\mu\sigma]$ 로 변환하는 식을 나타낸 것이다.

$$Z = \%Z \cdot \frac{10[(kV)_{base}]^2}{(KVA)_{base}} = \%Z \cdot 2.3716[\Omega] \quad (1)$$

$$Y = \%Y \cdot \frac{10(kVA)_{base}}{[(KV)_{base}]^2} = \%Y \cdot 42.1656[\mu\sigma] \quad (2)$$

다. 부하모델의 구성

전력계통에는 특성이 다른 다양한 부하들이 연결되어 있어서 이 부하를 수식적으로 표현하기는 그리 쉽지 않지만 본 논문은 동적특성을 갖는 부하가 필요하지 않으므로 직렬모델을 사용하였다.

따라서 본 연구에서는 부하모델을 수립하기 위하여 유효전력

은 실제의 유효전력을 사용하였고 무효전력은 역률을 0.95로 가정하여 구하였다. 그리고 모선전압은 160kV 사용하여 부하임피던스를 구하였다. 식 (3), (4)는 부하전력과 모선전압으로부터 부하모델을 수립하는 유도과정이다.

$$S_L = P_L + jQ_L = V^2 \cdot Y_p^* = \frac{V^2}{Z_s^*} \quad (3)$$

$$Z_s = \frac{V^2}{S^*} = \frac{V^2}{P_L - jQ_L} = \frac{V^2}{S_L (\cos \theta - j \sin \theta)}$$

$$= \frac{V^2}{S_L} (\cos \theta + j \sin \theta) = R_s + jX_s \quad (4)$$

$$\text{단, } \theta = \tan^{-1} \frac{X_L}{R_s}$$

3. 아킹모델의 구성

본 논문에서 지금까지 밝혀진 아킹전류와 파형을 근거로 하여 EMTDC에서 사고모델계통을 구성한 상태에서 시뮬레이션 하기 위해 저항을 변화시키는 대신에 전압을 다소 비선형적으로 변화 시킴으로써 비선형 저항과 전류를 유도할 수 있다. 따라서 Variable RLC를 이용한 HIF모델을 제안하였으며 아울러 IEEE HIF모델과 혼합하여 구성한 NewArc HIF모델을 제안하여 EMTDC내에서 아킹을 동반하는 사고의 시뮬레이션 분석에 적용하였다.

3.1 IEEE HIF모델

이 모델은 EMTP적용을 위해 제시된 HIF모델로서 기본 원리는 각각 2개의 다이오드와 DC전압원을 역병렬로 연결하여 사고 전류의 파형을 만든 것으로 그림 2에서 전류의 파형을 보이고 있다.

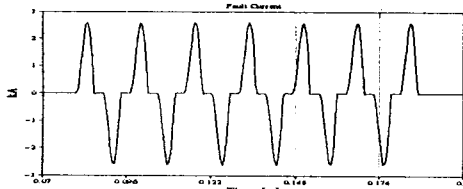


그림 2. IEEE HIF 모델의 전류파형

3.2 Variable RLC를 이용한 HIF모델

고저항지락사고시 예상되는 고저항을 추정하기 위해 제시한 모델로 Variable RLC에 전압신호로 삼각파나 펄스파와 2차제어 함수를 가해줌으로써 전류의 파형을 선형적으로 진동하여 증가할 수 있도록 하였다. 그림 2는 고장전류의 파형을 나타낸 것으로 전류가 선형적으로 증가함을 알 수 있다. 식 (5)는 2차제어 함수를 나타낸 것으로 G는 이득, z는 댐핑비율이며 W₀는 자연주파수이다. 여기서는 주파수는 60Hz로 설정하였고, 식(6)은 z가 1인 경우 식(5)를 시간의 함수로 나타낸 것이다.

$$G(s) = G \frac{\frac{s}{W_0} (1 - \frac{s}{W_0})}{1 + 2z \frac{s}{W_0} + \frac{s^2}{W_0^2}} \quad (5)$$

$$V(t) = (W_0 - 1) \cdot e^{-W_0 t} + (W_0 - W_0^2) \cdot t e^{-W_0 t} \quad (6)$$

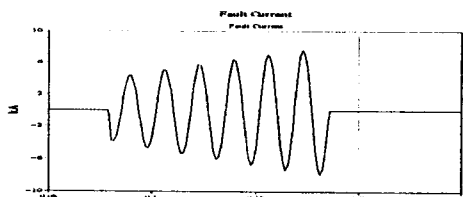


그림 3. Variable RLC를 이용한 HIF모델의 전류파형

3.3 NewArc HIF모델

본 논문에서 제시한 가장 이상적인 모델로 사료되며 이 모델은 3.1의 IEEE HIF모델과 3.2의 Variable RLC HIF모델을 혼합한 모델이다. 그림 3은 두 모델을 혼합한 전류의 파형을 나타낸 것으로 실제 사고 전류의 파형과 비슷함을 알 수 있다.

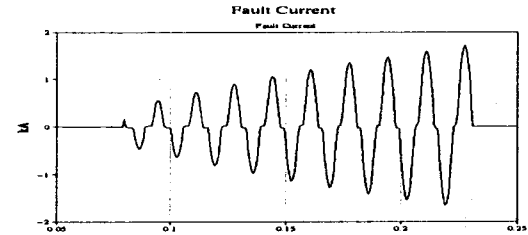


그림 4. NewArc HIF모델의 전류파형

4. 시뮬레이션 및 고찰

4.1 EMTDC의 출력 결과 비교 및 분석

사고모델계통에서 사고점에 고저항 지락사고를 발생시킨 후 EMTDC가 보여주는 선로 및 부하의 유효전력조류, 전류의 크기 등을 비교 및 검토하였다. 본 논문에서는 지면상 선로의 유효전력조류 및 전류의 크기만을 나타내었다. 표 2는 사고모델계통에서의 선로전류를 비교한 것으로 대부분의 선로가 비슷한 값을 가지지만 그 값이 정확하지 못한 구간의 선로정수의 영향 때문인 것으로 판단되면 정확한 값을 얻기 위해서는 선로정수의 정확한 검토가 필요한 것으로 사료된다.

표 2. 사고모델계통에서의 선로전류 비교

변전소		선로 전류 [A]							
		# 1 T/L		# 2 T/L		# 3 T/L		# 4 T/L	
From	To	실계값	EMTDC값	실계값	EMTDC값	실계값	EMTDC값	실계값	EMTDC값
A	C	650	636	650	636	-	-	-	-
A	D	600	458	600	458	-	-	-	-
A	E	600	603	605	603	611	603	604	603
B	A	230	226	230	226	-	-	-	-
E	F	482	495	489	495	478	485	493	485
F	G	502	474	504	474	-	-	-	-
G	H	230	204	204	221	-	-	-	-
H	I	273	263	-	-	-	-	-	-
I	J	118	107	-	-	-	-	-	-
F	J	434	501	-	-	-	-	-	-

또한 표 3은 각 선로의 유효전력을 비교한 것으로 실제 데이터와 EMTDC내에서 산출값과 비교하여 보았으며 그 결과는 표 5와 같으며 각각의 변전소와의 데이터를 비교해보면 거의 비슷한 값을 가진다.

표 3. 사고모델계통에서의 유효전력조류 비교

변전소		유효전력 [MW]							
		# 1 T/L		# 2 T/L		# 3 T/L		# 4 T/L	
From	To	실계값	EMTDC값	실계값	EMTDC값	실계값	EMTDC값	실계값	EMTDC값
		1, 190 (1, 205)							
A	C	-	-	-	-	-	-	-	-
A	D	170	176	170	176	-	-	-	-
A	E	117	121	117	121	-	-	-	-
B	A	165	168	168	168	167	168	167	168
E	F	60	60	60	60	-	-	-	-
F	G	134	138	136	138	133	134	136	134
G	H	138	134	138	134	-	-	-	-
H	I	60	56	60	53	-	-	-	-
I	J	30	28	-	-	-	-	-	-
F	J	119	133	-	-	-	-	-	-
H	J	74	69	-	-	-	-	-	-

* ()는 EMTDC 내에서의 유효전력

마지막으로 부하전력의 값은 앞서 제시한 직렬모델을 사용하였으며 직렬모델로도 거의 정확한 부하를 표현할 수 있음을 알 수 있으며 본 논문에서는 생략하였다.

4.2 사고현상 분석

4.2.1 시불변 고저항 지락사고

고저항 지락사고시의 현상을 분석하기 위해 I S/S - J S/S 구간 중 I S/S에서 J S/S 방향으로 약 70% 지점에서 시불변의 고장저항(R_f)을 갖는 사고를 발생시켰다. 표 4는 각각의 고장저항을 갖는 고저항 지락사고에서 I S/S - J S/S 구간선로의 사고점을 향한 선로양단 주입전류와 고장전류를 분석하였으며 고장 전압이 0도, 45도 및 90도의 경우에서 고장전류를 구하였다.

표 4. EMTDC내에서 얻은 고장전류결과

순서	고장저항 값: [Ω]	사고구간 선로 최대 고장전류[kA]															
		0°(0.3614 Sec)				45°(0.3635 Sec)				90°(0.3545 Sec)							
		I→J	J→I	고장전류	고장전류	I→J	J→I	고장전류	고장전류	I→J	J→I	고장전류	고장전류				
1	5	5.390	7.640	12.96	4.990	7.070	12.11	4.550	6.850	11.40	4.550	6.850	11.39	4.680	6.920	11.65	
		3.800	5.300	9.090	3.570	5.119	8.640	3.500	5.140	8.640	3.500	5.200	8.640	3.500	5.190	8.640	3.547
2	10	1.930	2.630	4.540	1.930	2.632	4.549	1.930	2.630	4.540	1.920	2.640	4.540	1.920	2.630	4.540	
		1.120	1.340	2.450	1.113	1.350	2.458	1.100	1.350	2.450	1.100	1.370	2.450	1.106	1.365	2.452	1.100
3	25	0.656	0.633	1.260	0.640	0.633	1.260	0.640	0.633	1.260	0.640	0.633	1.260	0.640	0.633	1.260	
		0.259	0.072	0.256	0.259	0.072	0.257	0.259	0.072	0.256	0.259	0.072	0.256	0.259	0.072	0.256	
4	50	0.205	0.091	0.128	0.205	0.091	0.129	0.205	0.091	0.129	0.205	0.091	0.128	0.205	0.091	0.128	
		0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.064	0.183	0.122	0.064	
5	100	0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.065	0.183	0.122	0.090	
		0.167	0.137	0.025	0.167	0.137	0.025	0.167	0.137	0.025	0.167	0.137	0.025	0.167	0.137	0.025	
6	500	0.160	0.137	0.025	0.160	0.137	0.025	0.160	0.137	0.025	0.160	0.137	0.025	0.160	0.137	0.025	

* () : fault time

4.2.2 아킹 모델

가) IEEE HIF모델

이 모델은 3.1에서 언급한 바와 같이 2개의 다이오드와 2개의 직류전원을 역병렬로 연결되어 구성된 것으로 이를 이용하여 사고를 모의하였다. 그림 5는 시뮬레이션 후 고장시간에 선로의 양단에 걸리는 전류와 고장전류를 나타내고 있다. 그림에서 고장전류의 파형을 비슷하게는 유도할 수는 있지만 고장저항을 추정하기에는 다소 어려움이 있으므로 HIF모델로 사용하기에는 부적합하리라 사료된다.

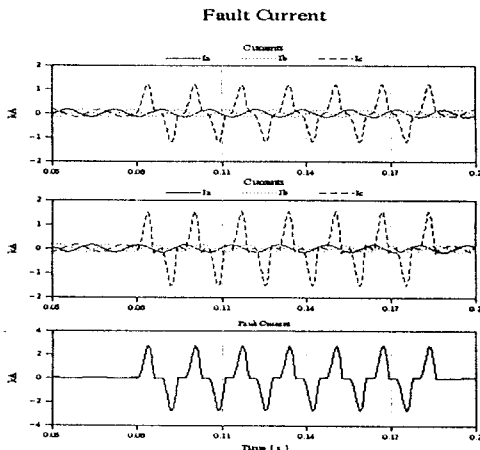


그림 5. 사고시 I - J S/S에서의 고장전류

나) Variable RLC를 이용한 HIF모델

이 모델은 고저항 값의 추정을 위해 제시한 모델로 Variable RLC에 전압신호와 삼각파와 2차제어함수를 가해줌으로써 전류의 파형을 진동하여 증가할 수 있도록 하였으며 그림 6에 나타내었다. 본 HIF모델로도 어느 정도 저항을 추정할 수 있으나 이 모델도 역시 사고전류파형과 비슷하지 않아 아킹현상을 분석하기

에는 부족하리라 사료된다.

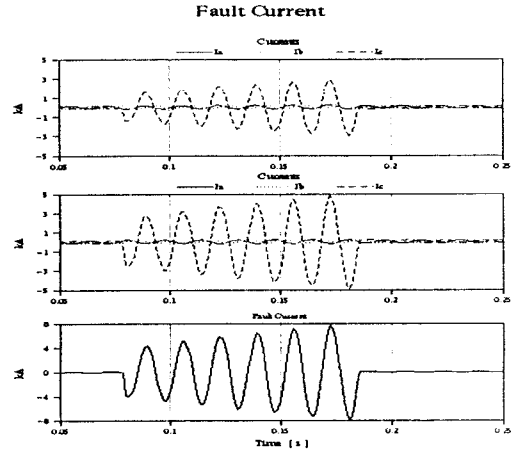


그림 6. 사고시 I - J S/S에서의 고장전류

다) NewArc HIF모델

본 논문에서 제시한 가장 이상적인 모델로 사료되며 이 모델은 가)의 IEEE HIF모델과 나)의 Variable RLC를 이용한 HIF모델을 혼합한 모델이다. 그림 6은 고장 후 I - J S/S간의 전류의 파형의 변화를 나타낸 것으로 고장전류의 파형이 실제사고전류의 파형과 비슷하게 나타내었다. 본 논문에서 제시한 모델중 가장 바람직한 모델로 사료된다.

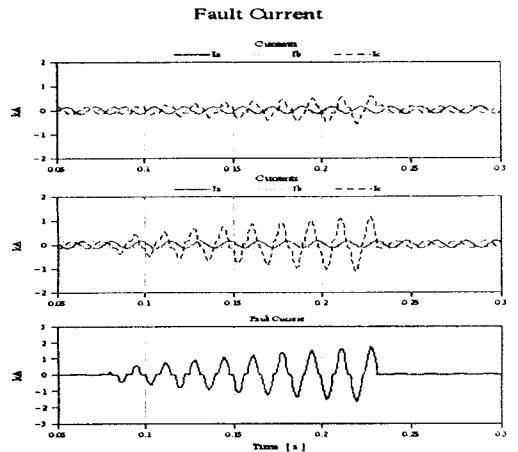


그림 7. 사고시 I - J S/S에서의 고장전류

5. 결 론

- (1) 본 연구에서는 EMTDC내에서 사고계통을 모델링하여 여러 사고현상의 특성을 파악하였다.
- (2) 고저항 지락사고시 예상되는 지락저항을 갖고 고장을 발생시켜 각종 고장 저항값에 따른 고장전류 및 그 특성을 분석하였다.
- (3) 고저항 지락사고시 발생하는 아킹전류를 시뮬레이션하기 위해 Variable RLC 및 기존에 제안된 IEEE HIF모델과 혼합된 NewArc HIF모델을 이용하여 아킹전류파형을 발생시키는 기법을 제안하였으며 이를 이용하여 아킹 발생시의 고장특성을 파악 및 분석하였다.

참 고 문 헌

- [1] V. L. Buchholz, et al., "High Impedance Fault Detection Device Tester", IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No. 1, Jan. 1996
- [2] Manitoba HVDC Research Centre, "EMTDC Custom Models Manual"