

단선 AT 급전계통의 전차선-레일 단락 고장전류 분석

The Analysis of Trolley-Rail Short Circuit Current in a Single Track AT Feeding System

조 규 정* · 류 규 상* · 이 훈 도* · 허 승 훈* · 김 철 환* · 권 성 일** · 김 철 환**
(Gyu-Jung Cho · Kyu-Sang Ryu · Hun-Do Lee · Seung-Hun Heo · Chul-Hwan Kim
· Sung-Il Kwon · Cheol-Hwan Kim)

Abstract - In general, AT(Auto-transformer) is used to improve voltage sag and inductive interference in power lines and communication lines in AC electrical railway feeding system. Especially, Korean AT feeding system has different composition compared to other countries like Japan or France, so that it has some special characteristics. However, relays imported from other countries have been used in Korea, and settings of these relays should be modified and reflect distinct characteristics of Korean AT feeding system. Therefore, study about fault analysis based on modeled AT feeding system is important. In this paper, we modeled a single track AT feeding system by using PSCAD and analyzed fault current flow in case of trolley-rail short circuit fault. Finally, we presented current magnitude of each branch expressed by boosting current of AT.

Key Words : AT Feeding System, Fault Current Analysis, Inductive Method, PSCAD

1. 서 론

국내의 교류 전기철도 계통은 흡상변압기(Booster Transformer, BT)를 사용하는 일부 산업선의 계통을 제외하면, 단권변압기(Auto Transformer, AT)를 사용하여 급전 구간 내 약 10[km]마다 전차에 전력을 공급하는 AT 급전계통 방식으로 구성되어 있다. 이러한 구성 방식은 프랑스와 일본의 전기철도 계통과 유사하지만 접지방식 등의 차이로 인하여 급전계통 내에서 발생한 고장에 대한 회로해석 결과는 상이하다. 따라서 국내 교류 전기철도 계통의 구성요소들에 대한 상세한 모델링과, 모델링된 계통에서 다양한 고장을 상정함으로써 국내 실정에 맞는 고장 데이터를 수집하는 것이 중요하다.

또한, 국내 전기철도의 전차선로 보호를 위하여 사용되는 고장점 표정장치는 프랑스, 일본, 독일에서 수입되어 사용되고 있다. 하지만 국내 전철 급전계통의 특수성 때문에, 변전소의 55[kV] 전압 레벨로 환산한 단락 고장 임피던스는 고장종류 및 고장위치, 급전계통의 구성 형태에 따라서 다르게 나타난다. 이는 타국의 고장점 표정장치를 통한 고장점 표정 시 적지 않은 오차를 야기하는 원인이 된다. 따라서 추후 신설될 변전소에 설치되는

국내 기술 기반의 고장점 표정장치의 개발과 기존 변전소의 보호계전기를 개선하는 연구 수행에 있어서 이 단락 임피던스의 계산은 거리계전기 및 고장점 표정장치의 정정과 관련하여 매우 중요한 사항이며, 모델링된 계통을 기반으로 다양한 고장에 대한 단락 임피던스 패턴 수집 및 고장전류에 대한 분석이 선행되어야 한다[1-4].

본 논문에서는 연구 수행을 위하여 간략화 된 단선 AT 급전계통을 모델링하였다. 모델링된 계통을 대상으로 다양한 조건의 고장들과 전차선로 임피던스의 가변을 상정하여, 각 AT와 전차선로에 분배되어 흐르는 고장전류의 크기와 방향을 분석하였다. 또한 일반적인 회로해석이 어려운 전기철도계통에 대한 해석방법으로, 대규모 전류 데이터들 사이의 관계식을 정립한 후 이론적 수식을 도출하는 귀납적 분석법을 제시하였다. 모든 모의는 PSCAD (Power Systems Computer Aided Design)를 통하여 수행되었다.

2. 단선 AT 계통의 단락 고장전류 분석

2.1 단선 AT 급전계통의 구성 형태

국내 교류 전기철도 계통의 대부분을 차지하고 있는 AT 급전 방식은 급전선로의 전압 강하율을 감소시켜 대전력의 장거리 송전에 유리하기 때문에 전기철도 변전소와 각 구분소들 사이의 간격을 넓게 할 수 있다. 다음 그림 1은 단선 AT 급전계통의 회로도를 나타낸다. 그림 1에서, S/S, SSP, SP는 각각 전기철도 변전소, 보조 급전 구분소, 급전 구분소를 나타낸다. 각 변전소와 구분소에는 AT가 설치되어 있으며 전차선과 급전선에 27.5[kV]의

* Corresponding Author : College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea
E-mail : hmwkim@hanmail.net

* College of Information and Communication Engineering, Sungkyunkwan University, Korea

** KOREA RAILROAD, Korea

Received : July 3, 2015; Accepted : November 17, 2015

전압을 공급한다. Z_l , Z_r , Z_f 는 전차선, 레일, 급전선의 임피던스 [Ω]를 나타내며, S/S-SSP 구간과 SSP-SP 구간의 거리가 다른 점을 고려하여 각 구간에 해당하는 임피던스를 1, 2의 숫자로 구분하였다. 실제 계통에는 보호선, 조가선과 같은 도체들이 분리되어 가선되어 있지만 해석의 용이함을 위하여 상기 3개의 도체군으로 등가화 시켜 해석한다[1, 2].

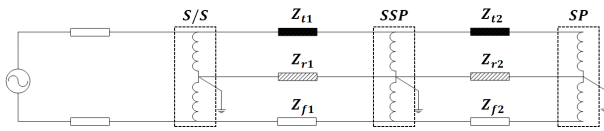


그림 1 단선 AT 급전계통의 회로도
Fig. 1 Circuit diagram of the single track AT feeding system

본 논문에서는 실제 계통 데이터를 이용한 그림 2와 같은 단선 AT 급전계통을 구성하였다.

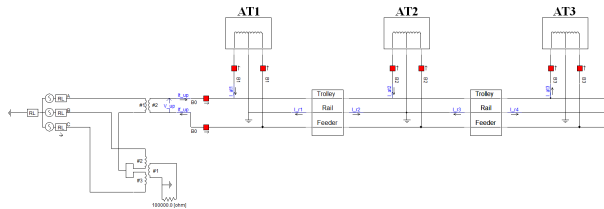


그림 2 PSCAD로 구현한 단선 AT 급전계통 모델
Fig. 2 Single track AT feeding system modeling by using PSCAD

AT1, AT2, AT3은 각각 S/S, SSP, SP에 급전하는 단권변압기들을 나타낸다. 모델 계통의 검증을 위하여 S/S-SSP 구간 길이의 10[%] 지점에 전차선 지락 고장을 모의하였다. 계통 파라미터는 다음 표 1과 같으며, 전차선 지락 고장 모의 시 고장 전류의 순시 파형은 다음 그림 3과 같다.

표 1 모델 계통 파라미터

Table 1 Parameters for modeled AT feeding system

구분	임피던스 값
전원단 정상분 임피던스 (Z_1)	0.4692+j3.3238[%]
스쿠트 변압기 임피던스 (Z_{Tr})	j10[%]
단권변압기 임피던스 (Z_{AT})	j0.45[Ω]
전차선 등가 임피던스 (Z_T)	0.1076+j0.2645[Ω /km]
레일 등가 임피던스 (Z_R)	0.1052+j0.4699[Ω /km]
급전선 등가 임피던스 (Z_f)	0.1180+j0.4548[Ω /km]

모델 계통에서 발생한 전차선 지락 고장 전류는 다음 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$I_{fault} = \frac{E}{2Z_1 + Z_{Tr} + Z_{AT} + l \times Z_T} = \frac{27,500}{2 \times (0.0355 + j0.2514) + j5.0417 + j0.45 + (0.1076 + j0.2645)} = 4.391 \angle -88.37^\circ [kA] \quad (1)$$

식에서 사용된 임피던스는 상기 표 1에 명시한 데이터와 같으며, AT 2차 측 전압인 27.5[kV] 기준으로 변환된 값을 이용하여 고장 전류를 계산하였다. 그림 3에 나타난 고장 전류의 대칭 싹치 값인 4.258[kA]와 식 (1)에 의한 계산 값 4.391[kA] 이 차이가 크지 않는 것으로, 계통 모델링의 적합성을 확인할 수 있다.

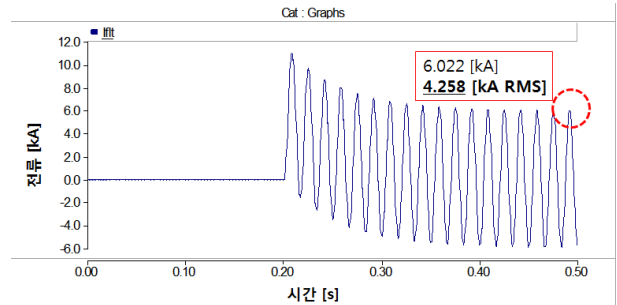


그림 3 전차선 지락 고장에 대한 고장전류 파형
Fig. 3 Fault current waveform for trolley wire ground fault

2.2 S/S-SSP 구간의 고장전류 분석

국내 단선 AT 급전계통에서, 각 AT의 중성점은 접지되어 있기 때문에 접지 측을 제외한 나머지 분기에서는 KCL(Kirchhoff's Current Law)이 성립하지 않는다. 따라서 단순히 회로이론 관련 공식을 적용하는 것으로는 회로를 분석하기 어렵다. 본 논문에서는 PSCAD를 이용한 시뮬레이션 이후, 수집된 대규모 전류 데이터들 사이에서 나타난 전류 간의 관계를 이론적 수식으로 표현하는 귀납적 분석법을 제시한다. 회로해석의 바탕이 되는, 데이터 수집을 위한 시뮬레이션 조건은 다음 표 2와 같다.

표 2 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation conditions

구분	전차선 Z_1 [Ω]	레일 Z_r [Ω]	급전선 Z_f [Ω]
Case 1	1~5	3	3
Case 2	3	1~5	3
Case 3	3	3	1~5
전원 측 임피던스: 1[Ω]으로 가정			

AT 급전계통에서 고장전류의 흐름에 큰 영향을 미치는 것은 전차선로의 임피던스이다. 따라서 상기 그림 2와 같은 모델 계통 내 S/S-SSP 구간 사이의 전차선과 레일 및 급전선 도체군의 임피던스를 독립적으로 가변시키며 각 분기에 흐르는 고장전류의

크기를 비교하였다. 변전소의 스코트 변압기 모델은 생략하였으며, 단권변압기의 누설리액턴스는 아주 작다고 가정하였다. 또한, 실제 교류 전기철도 변전소 스코트 변압기 2차 측 전압을 고려하여 전원 측 전압을 55[kV]로 인가하였다. 고장 저항은 0.1[Ω]으로 가정하였으며, S/S-SSP 구간 사이의 전차선-레일 단락 고장을 상정하였다. 각 분기에 흐르는 전류는 다음 그림 4와 같이 가정하였다.

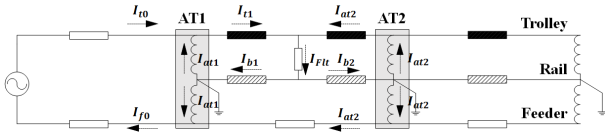


그림 4 S/S-SSP 구간 고장에 대한 고장전류 흐름
Fig. 4 Fault current flow for S/S-SSP section fault

Case 1의 $Z_{f1} = 1[\Omega]$ 의 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 다음 표 3과 같다.

표 3 고장위치에 따른 분기별 전류 크기 (Case 1, $Z_{f1} = 1[\Omega]$)
Table 3 Current magnitude of each branch according to fault location

고장 위치 [%]	분기별 전류 크기 [kA]			
	I_{Tt}	I_{f0}	I_{f1}	I_{f2}
10	28.36	14.18	14.18	27.65
20	21.60	10.80	10.80	20.52
30	18.20	9.10	9.10	16.83
40	16.33	8.17	8.17	14.70
50	15.35	7.67	7.67	13.43
60	14.99	7.50	7.50	12.74
70	15.18	7.59	7.59	12.52
80	15.95	7.97	7.97	12.76
90	17.50	8.75	8.75	13.56

고장 위치 [%]	분기별 전류 크기 [kA]			
	I_{at1}	I_{at2}	I_{b1}	I_{b2}
10	13.47	0.71	25.52	2.84
20	9.72	1.08	17.28	4.32
30	7.73	1.36	12.74	5.46
40	6.53	1.63	9.80	6.53
50	5.76	1.92	7.67	7.67
60	5.25	2.25	6.00	9.00
70	4.93	2.66	4.55	10.63
80	4.78	3.19	3.19	12.76
90	4.81	3.94	1.75	15.75

상기 표 2와 같은 다양한 시뮬레이션 조건 하에서, 표 3과 같은 고장 거리에 따른 분기별 전류 크기 데이터를 매 시뮬레이션 마다 수집하였다. 이 때 각 AT의 중성점에서, 접지 축을 제외한 나머지 분기인 레일과 AT 권선에 적용할 수 있는 KCL 전류 방정식은 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} I_{b1} &= 2 \times I_{at1} \\ I_{b2} &= 2 \times I_{at2} \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, I_{b1} , I_{b2} 는 각각 AT1과 AT2의 중성점으로 흡상되는 전류의 크기를 의미하며 I_{at1} , I_{at2} 는 각각 해당 AT의 권선에 흐르는 전류의 크기를 의미한다. 하지만 AT 중성점이 접지된 계통에서는 식 (2)와 같은 관계식이 성립되지 않는다. 이는 표 3에서도 명백하게 드러난다. 수집된 데이터를 분석한 결과, AT2의 중성점에 흡상되는 흡상전류 I_{b2} 와 AT2의 권선에 흐르는 전류 I_{at2} 는 특정한 관계를 만족시키는 것을 확인하였다. 이는 고장이 발생한 위치와 관계없는 일정한 비율로서, 전차선로의 임피던스 크기에 의존적인 경향을 보인다. 다음 표 4는 각 case에서 계산한, (I_{b2}/I_{at2})의 비율을 나타낸다.

표 4 Case 별 계산된 (I_{b2}/I_{at2}) 값
Table 4 Calculated (I_{b2}/I_{at2}) values for each case

구 분	가변된 임피던스 값에 따른 비율 (I_{b2}/I_{at2})				
	1[Ω]	2[Ω]	3[Ω]	4[Ω]	5[Ω]
Case 1 (전차선 Z_{f1} 가변)	4	2.5	2	1.75	1.6
Case 2 (레일 Z_{r1} 가변)	2	2	2	2	2
Case 3 (급전선 Z_{f1} 가변)	4/3	5/3	2	7/3	8/3

표 3과 표 4의 case 1 ($Z_{f1} = 1[\Omega]$)을 비교하면, AT2의 중성점으로 흡상되는 고장전류와 이에 따라 AT2의 권선에 흐르게 되는 전류는 고장위치에 관계없이 일정한 비율을 갖는 선형적인 관계임을 알 수 있다. 이는 모든 case에서 나타난 공통적인 특징으로, 다음 식 (3)과 같은 특징을 갖는 것을 확인하였다.

$$\begin{aligned} \frac{I_{b2}}{I_{at2}} &= \frac{Z_{f1} + Z_{f1}}{Z_{f1}} \\ \therefore I_{at2} &= \left(\frac{Z_{f1}}{Z_{f1} + Z_{f1}} \right) \times I_{b2} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)과 같은 관계식을 통하여, 다음 그림 5와 같이 모든 분기에 흐르는 전류의 크기를 흡상전류인 I_{b1} , I_{b2} 로 나타낼 수 있다.

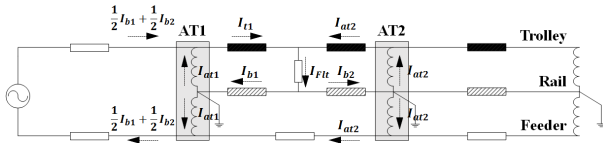


그림 5 S/S-SSP 구간 고장에 대한 고장전류의 크기
Fig. 5 Fault current magnitude for S/S-SSP section fault

$$\begin{aligned}
 \text{여기서, } I_{at1} &= \frac{1}{2} I_{b1} + \frac{1}{2} I_{b2} \times \left\{ 1 - 2 \left(\frac{Z_{t1}}{Z_{t1} + Z_{f1}} \right) \right\} \\
 I_{t1} &= I_{b1} + I_{b2} \times \left\{ 1 - \left(\frac{Z_{t1}}{Z_{t1} + Z_{f1}} \right) \right\} \\
 I_{at2} &= \left(\frac{Z_{t1}}{Z_{t1} + Z_{f1}} \right) \times I_{b2}
 \end{aligned}$$

위와 같은 관계식은 각 AT의 중성점을 제외한 다른 마디에서, KCL 방정식을 적용하여 구할 수 있다. 이는 접지된 AT의 중성점을 제외한 다른 마디에서는 KCL 이 성립하기 때문이다.

추가적인 시뮬레이션 수행을 통하여 SSP-SP 구간의 전차선로 임피던스의 크기를 나타내는 Z_{t2} , Z_{r2} , Z_{f2} 의 변화는 S/S-SSP 구간 고장으로 인한 고장전류에 영향을 주지 않는 것을 확인하였다.

2.3 SSP-SP 구간의 고장전류 분석

2.2절과 마찬가지로, SSP-SP 구간에서 발생한 고장에 대해서도 동일한 분석을 수행하였다. 상기 그림 2의 모델 계통 내 S/S-SSP 구간의 전차선로 임피던스 Z_{t1} , Z_{r1} , Z_{f1} 과 SSP-SP 구간의 전차선로 임피던스 Z_{t2} , Z_{r2} , Z_{f2} 를 모두 가변하며 시뮬레이션을 진행하였으며, 시뮬레이션 조건은 다음 표 5와 같다. 각 구간의 임피던스를 가변할 때, 다른 구간의 임피던스는 $3[\Omega]$ 으로 고정시켜 독립적인 영향을 비교하였다. 고장 저항은 2.2절과 동일하게 $0.1[\Omega]$ 으로 가정하였으며, SSP-SP 구간 사이의 전차선-레일 단락 고장을 상정하였다.

표 5 시뮬레이션 조건
Table 5 Simulation conditions

구 분	전차선 $Z_{t1} [\Omega]$	레일 $Z_{r1} [\Omega]$	급전선 $Z_{f1} [\Omega]$
Case 1	1~5	3	3
Case 2	3	1~5	3
Case 3	3	3	1~5
$Z_{t1} = Z_{r1} = Z_{f1} = 3[\Omega]$ 으로 가정			
구 분	전차선 $Z_{t2} [\Omega]$	레일 $Z_{r2} [\Omega]$	급전선 $Z_{f2} [\Omega]$
Case 4	1~5	3	3
Case 5	3	1~5	3
Case 6	3	3	1~5
$Z_{t2} = Z_{r2} = Z_{f2} = 3[\Omega]$ 으로 가정			

각 분기에 흐르는 전류를 다음 그림 6과 같이 가정하였을 때, case 1의 $Z_{t1} = 1[\Omega]$ 의 경우에 대한 시뮬레이션 결과는 다음 표 6과 같다.

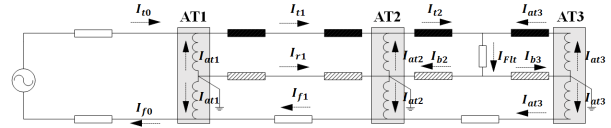


그림 6 SSP-SP 구간 고장에 대한 고장전류 흐름
Fig. 6 Fault current flow for SSP-SP section fault

여기서, I_{b2} 와 I_{b3} 은 각각 AT2와 AT3의 중성점을 통하여 흡상되는 전류의 크기를 의미하며 I_{at1} , I_{at2} , I_{at3} 은 각각 해당 AT의 권선에 흐르는 전류의 크기를 의미한다. SSP-SP 구간 고장의 경우에서도 2.2절의 분석결과와 마찬가지로 AT의 중성점에서는 식 (2)와 같은 관계식이 성립되지 않는다. 이는 표 6에서도 명백하게 드러난다. 다음 표 7은 SSP-SP 구간의 임피던스를 가변시킨 case 4에서, $Z_{t2} = 1[\Omega]$ 의 경우에 대한 결과를 나타낸다.

표 6 고장위치에 따른 분기별 전류 크기 (Case 1, $Z_{t1} = 1[\Omega]$)
Table 6 Current magnitude of each branch according to fault location

고장 위치 [%]	분기별 전류 크기 [kA]					
	I_{ft}	I_{t0}	I_{f0}	I_{t1}	I_{r1}	I_{f1}
10	14.40	7.20	7.20	10.80	0	3.60
20	11.58	5.79	5.79	8.68	0	2.89
30	9.99	5.00	5.00	7.50	0	2.50
40	9.05	4.53	4.53	6.79	0	2.26
50	8.51	4.25	4.25	6.38	0	2.13
60	8.24	4.12	4.12	6.18	0	2.06
70	8.20	4.10	4.10	6.15	0	2.05
80	8.39	4.19	4.19	6.29	0	2.10
90	8.83	4.42	4.42	6.63	0	2.21
고장 위치 [%]	분기별 전류 크기 [kA]					
	I_{t2}	I_{at1}	I_{at2}	I_{at3}	I_{b2}	I_{b3}
10	13.68	3.60	2.88	0.72	12.96	1.44
20	10.42	2.89	1.74	1.16	9.26	2.32
30	8.50	2.50	1.00	1.50	7.00	3.00
40	7.24	2.26	0.45	1.81	5.43	3.62
50	6.38	2.13	0.00	2.13	4.25	4.25
60	5.77	2.06	0.41	2.47	3.30	4.94
70	5.33	2.05	0.82	2.87	2.46	5.74
80	5.03	2.10	1.26	3.36	1.68	6.71
90	4.86	2.21	1.77	3.98	0.88	7.95

표 7 고장위치에 따른 분기별 전류 크기 (Case 4, $Z_2 = 1[\Omega]$)

Table 7 Current magnitude of each branch according to fault location

고장 위치 [%]	분기별 전류 크기 [kA]					
	I_{Ft}	I_{t0}	I_{f0}	I_{t1}	I_{r1}	I_{f1}
10	11.12	5.56	5.56	5.56	0	5.56
20	9.90	4.95	4.95	4.95	0	4.95
30	9.12	4.56	4.56	4.56	0	4.56
40	8.63	4.31	4.31	4.31	0	4.31
50	8.35	4.17	4.17	4.17	0	4.17
60	8.24	4.12	4.12	4.12	0	4.12
70	8.30	4.15	4.15	4.15	0	4.15
80	8.52	4.26	4.26	4.26	0	4.26
90	8.94	4.47	4.47	4.47	0	4.47

고장 위치 [%]	분기별 전류 크기 [kA]					
	I_{t2}	I_{at1}	I_{at2}	I_{at3}	I_{b2}	I_{b3}
10	10.84	0.00	5.28	0.28	10.01	1.11
20	9.41	0.00	4.46	0.50	7.92	1.98
30	8.44	0.00	3.88	0.68	6.39	2.74
40	7.76	0.00	3.45	0.86	5.18	3.45
50	7.30	0.00	3.13	1.04	4.17	4.17
60	7.00	0.00	2.88	1.24	3.30	4.94
70	6.84	0.00	2.70	1.45	2.49	5.81
80	6.82	0.00	2.56	1.70	1.70	6.82
90	6.93	0.00	2.46	2.01	0.89	8.05

표 6, 표 7과 같이 모든 case에서 수집된 데이터를 분석한 결과, AT3의 중성점에 흡상되는 흡상전류 I_{b3} 과 AT3의 권선에 흐르는 전류 I_{at3} 는 특정한 관계를 만족시키는 것을 확인하였다. 다음 표 8은 각 case에서 계산한, (I_{b3}/I_{at3}) 의 비율을 나타낸다.

표 8 Case 별 계산된 (I_{b3}/I_{at3}) 값

Table 8 Calculated (I_{b3}/I_{at3}) values for each case

구 분	가변된 임피던스 값에 따른 비율 (I_{b3}/I_{at3})				
	(I_{b3}/I_{at3})				
	1[Ω]	2[Ω]	3[Ω]	4[Ω]	5[Ω]
Case 1 (Z_{t1} 가변)	2	2	2	2	2
Case 2 (Z_{r1} 가변)	2	2	2	2	2
Case 3 (Z_{f1} 가변)	2	2	2	2	2
Case 4 (Z_{t2} 가변)	4	2.5	2	1.75	1.6
Case 5 (Z_{r2} 가변)	2	2	2	2	2
Case 6 (Z_{f2} 가변)	4/3	5/3	2	7/3	8/3

계산된 전류비는 S/S-SSP 구간의 전차선로 임피던스의 크기 변화와는 무관하며 SSP-SP 구간의 전차선로 임피던스 크기에 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 이는 고장위치와 관계없이 모든 case에서 공통적으로 나타난 선형적인 특징으로, 다음 식 (4)와 같은 특징을 갖는 것을 확인하였다.

$$\frac{I_{b3}}{I_{at3}} = \frac{Z_{t2} + Z_{f2}}{Z_{t2}}$$

$$\therefore I_{at3} = \left(\frac{Z_{t2}}{Z_{t2} + Z_{f2}} \right) \times I_{b3} \quad (4)$$

도출된 관계식은 S/S-SSP 구간에서 발생한 고장과 동일한 경향을 나타내며, 고장 발생 시 고장 구간 내 전원으로부터 가장 멀리 떨어진 AT의 권선과 중성점에 흐르는 전류는 항상 같은 비율을 갖는 특징을 가지고 있음을 알 수 있다.

또한, S/S-SSP 구간의 고장과는 다르게 AT1의 권선으로 흐르는 전류 I_{at1} 과 S/S-SSP 구간의 전차선과 급전선에 흐르는 전류의 크기를 나타내는 I_{t1} , I_{f1} 사이에서도 고장위치와 관계없이 일정한 전류비를 만족시키는 것을 확인하였다. 다음 표 9는 각 case에서 계산한, (I_{t1}/I_{at1}) 의 비율을 나타낸다. 분석 결과, S/S-SSP 구간의 전차선과 급전선 전체 저항의 크기인 Z_{t1} , Z_{f1} 과 관련된 관계식을 통하여 전류비를 수식적으로 표현할 수 있으며, 이는 다음 식 (5)와 같다.

$$\frac{I_{t1}}{I_{at1}} = \frac{Z_{f1}}{\left| \frac{Z_{t1} - Z_{f1}}{2} \right|}$$

$$\therefore I_{at1} = \left(\frac{\left| \frac{Z_{t1} - Z_{f1}}{2} \right|}{Z_{f1}} \right) \times I_{t1} \quad (5)$$

표 9 Case 별 계산된 (I_{t1}/I_{at1}) 값

Table 9 Calculated (I_{t1}/I_{at1}) values for each case

구 분	가변된 임피던스 값에 따른 비율 (I_{t1}/I_{at1})				
	1[Ω]	2[Ω]	3[Ω]	4[Ω]	5[Ω]
Case 1 (Z_{t1} 가변)	3	6	∞	6	3
Case 2 (Z_{r1} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞
Case 3 (Z_{f1} 가변)	1	4	∞	8	5
Case 4 (Z_{t2} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞
Case 5 (Z_{r2} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞
Case 6 (Z_{f2} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞

다음 표 10은 각 case에서 계산된 (I_{f1}/I_{at1}) 의 비율을 나타낸다. I_{t1} 의 경우와 마찬가지로 고장이 발생한 위치에 관계없이 일정한 전류비를 만족시키는 것을 확인하였으며, 수식으로 표현하면 식 (6)과 같다.

표 10 Case 별 계산된 (I_{f1}/I_{at1}) 값

Table 10 Calculated (I_{f1}/I_{at1}) values for each case

구 분	가변된 임피던스 값에 따른 비율 (I_{b3}/I_{at3})				
	1[Ω]	2[Ω]	3[Ω]	4[Ω]	5[Ω]
Case 1 (Z_{r1} 가변)	9	4	∞	8	5
Case 2 (Z_{r1} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞
Case 3 (Z_{f1} 가변)	3	6	∞	6	3
Case 4 (Z_{r2} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞
Case 5 (Z_{r2} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞
Case 6 (Z_{f2} 가변)	∞	∞	∞	∞	∞

$$\frac{I_{f1}}{I_{at1}} = \frac{Z_{r1}}{\left| \frac{Z_{r1} - Z_{f1}}{2} \right|}$$

$$\therefore I_{at1} = \left(\frac{\left| \frac{Z_{r1} - Z_{f1}}{2} \right|}{Z_{r1}} \right) \times I_{f1} \quad (6)$$

SSP-SP 구간 고장에 대한 고장전류 분석과 식 (4), (5), (6)을 참조하여 다음 그림 7과 같이 모든 분기에 흐르는 전류의 크기를 고장 지점 양단의 AT2와 AT3의 중성점으로 흡상되는 전류인 I_{b2} , I_{b3} 로 나타낼 수 있다.

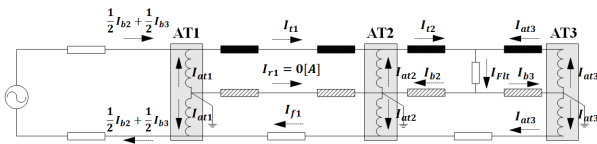


그림 7 SSP-SP 구간 고장에 대한 고장전류의 크기
Fig. 7 Fault current magnitude for SSP-SP section fault

여기서, $I_{at1} = \left(\frac{k}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b2} + \left(\frac{k}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b3}$

$$I_{at2} = \left(\frac{Z_{r1}}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b2} + \left\{ \left(\frac{Z_{r1}}{2Z_{r1} + 2k} \right) - \left(\frac{Z_{r2}}{Z_{r2} + Z_{f2}} \right) \right\} \times I_{b3}$$

$$I_{at3} = \left(\frac{Z_{r2}}{Z_{r2} + Z_{f2}} \right) \times I_{b3}$$

$$I_{t1} = \left(\frac{Z_{r1} + 2k}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b2} + \left(\frac{Z_{r1} + 2k}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b3}$$

$$I_{f1} = \left(\frac{Z_{r1}}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b2} + \left(\frac{Z_{r1}}{2Z_{r1} + 2k} \right) \times I_{b3}$$

$$I_{t2} = I_{b2} + \left\{ 1 - \left(\frac{Z_{r2}}{Z_{r2} + Z_{f2}} \right) \right\} \times I_{b3}$$

(단, $k = \left| \frac{Z_{r1} - Z_{f1}}{2} \right|$)

위와 같은 관계식은 2.2절의 S/S-SSP 구간 고장에 대한 전류 해석과 마찬가지로, 각 AT의 중성점이 아닌 KCL이 성립하는 마디에서 KCL 방정식을 적용하여 구할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 단선 AT 급전계통을 모델링한 후 전차선-레일 단락 고장전류의 흐름을 분석하였다. 연구를 통하여, 국내 계통과 같이 중성점이 레일과 접지된 AT 급전계통에서는 AT의 중성점 마디에서 KCL이 성립하지 않는 것을 확인하였다. 또한 이렇게 KCL이 성립하지 않는 특수한 경우에 대한 회로해석 기법으로 다양한 시뮬레이션을 통한 데이터를 수집한 이후, 각 분기에 흐르는 전류들의 관계식을 귀납적으로 도출하는 방법을 제시하였다. 최종적으로, 중성점으로 흡상되는 전류가 AT의 권선을 통하여 분배되는 것은 전차선로의 구성요소 중 전차선과 급전선의 임피던스 크기에 크게 의존적임을 확인하였으며 단락 고장이 발생한 구간에 따른 고장전류의 흐름을 고장지점 양단의 AT에 흡상되는 흡상전류에 대한 관계식으로 표현할 수 있음을 보였다. 본 논문의 연구 결과를 바탕으로 한, 교류 전기철도 계통에 적용될 수 있는 고장점 표정 기법 및 고장 전류에 대한 상세 해석과 관련된 추가적인 연구가 진행 중에 있다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 철도기술연구사업의 연구비지원 (15RTRP-B082449-02-000000)에 의해 수행되었습니다.

References

- [1] Jung-Cheol Kim, Analysis of power supply system and understanding of the Korean electric railway, Kidari, 2008.
- [2] Baik Kim, "Electric railway power engineering", Kidari, 2005.
- [3] Ho-Sung Jung, "A Study on Real Time Catenary Impedance Estimation Technique using the Synchronized Measuring Data between Substation and Train", The Transactions of the KIEE, Vol. 62, No. 10, pp. 1458-1464, 2013.
- [4] Ho-Sung Jung, Young Park, Hyeng-Chul Kim, Myung-Hwan Min, Myong-Chul Shin, "A Study on Fault Location Estimation Technique Using the distribution Ratio of Catenary Current in AC Feeding System", Journal of the Korean Society for Railway, Vol. 14, No. 5, pp. 404-410, October 2011.

저 자 소 개



조 규 정 (Gyu-Jung Cho)

1986년 12월 20일생. 2012년 성균관대 정보통신공학부 졸업. 2014년 성균관대 정보통신대학 졸업(석사). 2014년~현재 동 대학원 정보통신대학 박사과정

Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : thug1220@naver.com



류 규 상 (Kyu-Sang Ryu)

1980년 08월 18일생. 2006년 건국대 전기공학과 졸업. 2014년~현재 성균관대 공과대학 석사과정

Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : taepoongman@naver.com



이 훈 도 (Hun-Do Lee)

1987년 7월 8일생. 2014년 한국외국어대 전자공학과 졸업. 2014년~현재 성균관대 공과대학 석사과정

Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : leehundo@naver.com



허 승 훈 (Seung-Hun Heo)

1989년 5월 12일생. 2015년 한밭대학교 전자공학과 졸업. 2015년~현재 성균관대 정보통신대학 석사과정

Tel : 031-299-4630
Fax : 031-299-4137
E-mail : yesok2323@naver.com



김 철 환 (Chul-Hwan Kim)

1961년 1월 10일생. 1982년 성균관대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 성균관대 정보통신대학 교수, 전력IT인력양성센터 센터장

Tel : 031-290-7124
Fax : 031-299-4137
E-mail : hmwkim@hanmail.net



권 성 일 (Sung-II Kwon)

1967년 12월 10일생. 1996년 충주대 전기공학과 졸업. 2012년 충북대 전기전산공학과 졸업(석사). 1992년~현재 한국철도공사 연구원 철도시스템개발연구단장

Tel : 042-615-5411
Fax : 02-361-8211
E-mail : kwon1911@korail.com



김 철 환 (Cheol-Hwan Kim)

1963년 11월 15일생. 1996년 서울산업대 전기공학과 졸업. 2002년 서울시립대 산업대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 1984년~현재 한국철도공사 부장

Tel : 061-749-2412
Fax : 061-749-2022
E-mail : kch9890@korail.com