

병행 2회선 송전선로에서의 고장점 표정 알고리즘

안용진 · 최민송 · 강상희 · 이승재
명지대학교

A Fault Location Algorithm of a Double-Circuit Line

Yong-Jin Ahn · Myeon-Song Choi · Sang-Hee Kang · Seung-Jae Lee
Myongji University

Abstract - Fault location algorithms based on the current distribution factors under the one-phase to earth fault condition of a double-circuit line are presented. The derivation method for current distribution factors is shown, to calculate fault current, fault resistance and the zero sequence current of other parallel circuit which are unknown. As the proposed algorithms 1,2,3 embody an accurate location by the voltage and the current of the relaying point.

를 유도하여 구할 수 있다. 영상분, 정상분, 역상분 전류분배계수는 식(1) ~ 식(5)와 같다.

1. 서 론

전력 수요의 증대에 따라 초고압화, 복잡화, 다양화되는 전력계통에 고장발생 시 건전 계통으로부터 고장계통의 신속한 격리, 사고 복구 등 양질의 전력을 공급하기 위한 전력계통의 신뢰성과 안정성을 위한 노력이 전력의 공급과 수요 측면에서 중요 시 되고 있다.

병행 2회선 송전선로에 지락고장이 발생하면, 정확한 고장점 표정을 위해서는 고장저항, 고장전류, 건전회선의 영상전류 등의 정보가 필요하다. 하지만, 이러한 정보를 알지 못하고 단지 자기단의 전압, 전류 정보만을 가지고 고장점을 표정하기에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 양단 전원임피던스, 선로정수, 고장저항 등으로 구성된 전력계통을 등가하여 계통 고장 시에 고장전류, 건전회선의 영상전류의 분포 등을 예측할 수 있는 전류분배계수를 이용한 고장점 표정이 많이 이루어진다.

본 논문에서는 고장점 표정에 영향을 주는 고장저항, 고장전류, 건전회선의 영상전류의 영향을 최소화하기 위하여, 자기단에서 얻을 수 있는 전압, 전류 정보와 전류분배계수를 이용하여 정확하고, 계통의 임피던스 변화에 강인한 고장점 표정 알고리즘들을 제안한다.

2. 고장점 표정 알고리즘

2.1 전류분배계수

병행 2회선 송전선로에 1선 지락고장이 발생하면 고장점에서의 전류의 분포는 그림 1에 나타난 계통의 임피던스의 분포에 따라 변화한다.

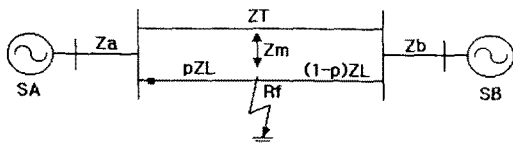


그림 1. 병행 2회선 등가회로(1선 지락시 단선도)

전류분배계수는 그림 2. a상 지락고장 시의 대칭분 회로에서 A경로와 B경로에서 얻어지는 전류방정식에서 구하고자하는 전류항을 제외한 나머지항을 소거하면, 자기단과 상대단의 전류비와 자기단과 건전회선의 전류비

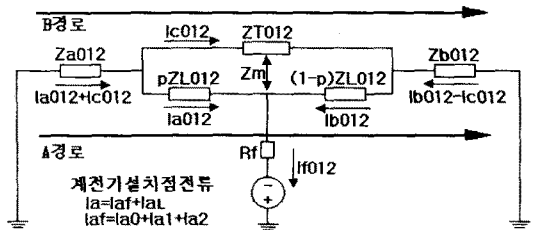


그림 2. 대칭분 회로(a상 지락고장 시)

그림 2에서,

- Z_{a012} : 전원SA의 영상, 정상, 역상임피던스[Ω]
- Z_{b012} : 전원SB의 영상, 정상, 역상임피던스[Ω]
- ZL_{012} : 고장회선 선로의 영상, 정상, 역상임피던스[Ω/km]
- ZT_{012} : 건전회선 선로의 영상, 정상, 역상임피던스[Ω/km]
- Zm : 회선간 선로의 영상상호임피던스[Ω/km]
- Rf : 고장점 저항[Ω]
- I_{f012} : 고장점에서의 영상, 정상, 역상전류[A]
- I_{a012} : 계전기설치점에서의 영상, 정상, 역상전류[A]
- I_{af} : 계전기설치점에서의 a상 순수고장전류[A]
- I_{aL} : 계전기설치점에서의 a상 부하전류[A]
- p : 계전기설치점에서 고장점까지의 거리[PU]

$$Da0 = \frac{I_{a0}}{I_{f0}} = \frac{pB_{a0} + C_{a0}}{A_{a0}} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} A_{a0} &= (ZL_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) + (ZT_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) \\ B_{a0} &= -(ZL_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) - (ZT_0 - Zm)ZL_0 \\ C_{a0} &= (ZL_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) + (ZT_0 - Zm)(Z_{b0} + ZL_0) \end{aligned}$$

$$Da1 = \frac{I_{a1}}{I_{f1}} = \frac{pB_{a1} + C_{a1}}{A_{a1}} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} A_{a1} &= ZL_1(Z_{a1} + Z_{b1}) + ZT_1(Z_{a1} + Z_{b1} + ZL_1) \\ B_{a1} &= -ZL_1(Z_{a1} + Z_{b1} + ZT_1) \\ C_{a1} &= ZL_1(Z_{a1} + Z_{b1} + ZT_1) + (ZT_1)(Z_{b1}) \end{aligned}$$

$$Da2 = \frac{I_{a2}}{I_{f2}} = \frac{pB_{a2} + C_{a2}}{A_{a2}} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} A_{a2} &= ZL_2(Z_{a2} + Z_{b2}) + ZT_2(Z_{a2} + Z_{b2} + ZL_2) \\ B_{a2} &= -ZL_2(Z_{a2} + Z_{b2} + ZT_2) \\ C_{a2} &= ZL_2(Z_{a2} + Z_{b2} + ZT_2) + (ZT_2)(Z_{b2}) \end{aligned}$$

$$Da3 = \frac{I_{a3}}{I_{f3}} = \frac{pB_{a3} + C_{a3}}{A_{a3}} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} A_{a3} &= (ZL_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) + (ZT_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) \\ B_{a3} &= (ZL_0 - Zm)(Z_{a0} + Z_{b0}) \\ C_{a3} &= -(ZL_0 - Zm)Z_{a0} \end{aligned}$$

$$Dca = \frac{I_{a3}}{I_{a0}} = \frac{pA_{ac} + B_{ac}}{pC_{ac} + D_{ac}} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} A_{ac} &= ZL_0(Z_{a0} + Z_{b0} + ZT_0) - Zm(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) \\ B_{ac} &= Zm(Z_{a0} + Z_{b0} + Zm) - ZL_0(Z_{a0} + Z_{b0} + ZT_0) + Z_{b0}(Zm - ZT_0) \\ C_{ac} &= (Zm - ZL_0)(Z_{a0} + Z_{b0}) \\ D_{ac} &= Z_{a0}(ZL_0 - Zm) \end{aligned}$$

2.2 알고리즘 1

그림 2에서 1선 지락 시에 고장 점으로 흐르는 전류는 영상, 정상, 역상이 같다.

$$I_0 = I_1 = I_2 \quad (6)$$

식 (6)을 전류분배계수를 이용하여 계전기 설치 점에서의 전류가 관계된 식으로 나타내면,

$$\frac{I_{a0}}{Da0} = \frac{I_{a1}}{Da1} = \frac{I_{a2}}{Da2} \quad (7)$$

식 (7)에서 영상과 정상, 영상과 역상, 정상과 역상의 관계식을 전개하면 계전기 설치 점에서 고장 점까지의 거리 p(이하 고장거리 p)의 함수로 표현된다. [1]

먼저 영상과 정상 전류분배계수의 관계식을 거리 p에 관하여 정리하면,

$$I_{a0} Da1 = I_{a1} Da0 \quad (8)$$

$$p = \frac{A_{a1} I_{a1} C_{a0} - A_{a0} I_{a0} C_{a1}}{A_{a0} I_{a0} B_{a1} - A_{a1} I_{a1} B_{a0}} \quad (9)$$

에서 고장거리 p를 구할 수 있다.

다음으로 정상과 역상 임피던스를 같다고 하면 영상과 역상 전류분배계수의 관계식에서 고장거리 p는 식(9)과 같고, 마지막으로 정상과 역상 전류분배계수의 관계식을 고장거리 p에 관하여 정리하면,

$$p = \frac{A_1 I_{a1} C_2 - A_2 I_{a2} C_1}{A_2 I_{a2} B_1 - A_1 I_{a1} B_2} = \frac{(A_1 C_2 - A_2 C_1)(I_{a1} - I_{a2})}{(A_2 B_1 - A_1 B_2)(I_{a2} - I_{a1})} \quad (10)$$

식(10)에서 $p = \frac{0}{0}$. 즉, 부정이 됨을 알 수 있다. 따라서 정상과 역상 전류분배계수 관계식은 사용할 수 없다.

2.3 알고리즘 2

그림 1에서 계전기 설치점에서의 전압은 다음과 같다.

$$V_a = p[I_2 ZL_1 + (ZL_0 - ZL_1)I_{a0}] + I_f R_f + I_{a0} p Zm \quad (11)$$

식(11)에서 I_f 와 I_{a0} 는 구할 수 없으므로 전류분배계수를 이용하여 계전기 설치점에서의 전류로 나타내면,

$$V_a = p[I_2 ZL_1 + (ZL_0 - ZL_1)I_{a0}] + \frac{3I_{a1}}{Da1} R_f + \frac{I_{a0}}{Dca} p Zm \quad (12)$$

여기서, 영상전류에는 건전회선의 영상전류의 영향이 있고, 영상분 배계수에는 건전회선의 영상분 상호임피던스가 포함되므로 $3I_{a0}/Da0$ 보다 $3I_{a1}/Da1$ 를 사용함으로써 오차를 줄일 수 있다.

식(2)와 (5)를 식 (12)에 대입하여 고장거리 p에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$(a_3 + jb_3)p^3 + (a_2 + jb_2)p^2 + [a_1 + jb_1 + (c_1 + jd_1)R_f]p + [a_0 + jb_0 + (c_0 + jd_0)R_f] = 0 \quad (13)$$

$$\begin{aligned} a_3 + jb_3 &= IZL_1 B_{a1} A_{ac} + B_{a1} C_{ac} I_{a0} Zm \\ a_2 + jb_2 &= IZL_1 B_{a1} B_{ac} + IZL_1 C_{a1} A_{ac} \\ &\quad - V_a B_{a1} A_{ac} + B_{a1} D_{ca} I_{a0} Zm + C_{a1} C_{ac} I_{a0} Zm \\ a_1 + jb_1 &= IZL_1 C_{a1} B_{ac} - V_a B_{a1} B_{ac} \\ &\quad - VC_{a1} A_{ac} + C_{a1} D_{ca} I_{a0} Zm \\ a_0 + jb_0 &= -V_a C_{a1} B_{ac} \\ c_1 + jd_1 &= 3A_{ac} A_{a1} I_{a1} \\ c_0 + jd_0 &= 3C_{ac} A_{a1} I_{a1} \end{aligned}$$

$$I = I_a + \frac{(ZL_0 - ZL_1)}{ZL_1} I_{a0}$$

식 (13)을 실수 부와 허수 부로 분리하면 고장거리 p에 관한 3차식 둘을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} a_3 p^3 + a_2 p^2 + (a_1 + c_1 R_f)p + (a_0 + c_0 R_f) &= 0 \\ b_3 p^3 + b_2 p^2 + (b_1 + d_1 R_f)p + (b_0 + d_0 R_f) &= 0 \end{aligned} \quad (14)$$

여기서 고장저항 R_f 를 소거하면,

$$p^4 + k_1 p^3 + k_2 p^2 + k_3 p + k_4 = 0 \quad (15)$$

$$\begin{aligned} k_1 &= (a_2 d_1 - b_2 c_1 + a_3 d_0 - b_3 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \\ k_2 &= (a_1 d_1 - b_1 c_1 + a_2 d_0 - b_2 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \\ k_3 &= (a_0 d_1 - b_0 c_1 + a_1 d_0 - b_1 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \\ k_4 &= (a_0 d_0 - b_0 c_0) / (a_3 d_1 - b_3 c_1) \end{aligned}$$

식(15)와 같다.

고장거리 p와 고장저항 R_f 는 식 (14)에서 뉴턴랩슨

법을 이용하여 구할 수 있고, 두 식에서 R_f 를 소거시킨 식(15)에서 p에 관한 4차 근의 공식을 이용하여 구할 수도 있다.

2.4 알고리즘 3

그림 2를 참고하여 식 (11)을 표현하면 다음과 같다.

$$V_a = p[ZL_1(I_{af} + I_{aL}) + (ZL_0 - ZL_1)I_{a0} + ZmI_{a0}] + I_f R_f \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \frac{V_a}{I_{af}} &= p[ZL_1(1 + \frac{I_{aL}}{I_{af}}) + (ZL_0 - ZL_1)\frac{I_{a0}}{I_{af}}] \\ &\quad + pZm\frac{I_{a0}}{I_{af}} + R_f\frac{I_f}{I_{af}} \end{aligned} \quad (17)$$

계전기 설치 점에서 순수고장전류 I_{af} 는 영상, 정상, 역상 전류의 합으로 식(18)임을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{af} &= I_{a0} + I_{a1} + I_{a2} \\ &= (Da0)I_0 + Da1 I_1 + Da2 I_2 = (Da0 + 2Da1) I_1 \end{aligned} \quad (18)$$

$$Da = \frac{I_{af}}{I_1} = (Da0 + 2Da1) = \frac{pB_a + C_a}{A_a} \quad (19)$$

$$\begin{aligned} A_a &= A_{a0} A_{a1} \\ B_a &= B_{a0} A_{a1} + 2B_{a1} A_{a0} \\ C_a &= C_{a0} A_{a1} + 2C_{a1} A_{a0} \end{aligned}$$

식(1), (4)와 (19)에서 다음을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{I_{a0}}{I_{af}} &= \frac{A_a}{A_{a0}} \frac{pB_a + C_a}{pB_a + C_a} \\ \frac{I_{a1}}{I_{af}} &= \frac{A_a}{A_{a0}} \frac{pB_a + C_a}{pB_a + C_a} \\ \frac{I_f}{I_{af}} &= \frac{3A_a}{pB_a + C_a} \end{aligned} \quad (20)$$

식 (17)에 식 (20)을 대입하여 p에 관하여 정리하면 식 (21) 고장거리 p에 관한 2차방정식을 얻을 수 있다.

$$(x_1 + jy_1)p^2 + (x_2 + jy_2)p + (x_3 + jy_3) + (x_4 + jy_4)R_f = 0 \quad (21)$$

$$\begin{aligned} x_1 + jy_1 &= ZL_1(1 + \frac{I_{aL}}{I_{af}})B_a + (ZL_0 - ZL_1)\frac{A_a}{A_{a0}} B_{a0} \\ &\quad + Zm\frac{A_a}{A_{a0}} B_{a0} \\ x_2 + jy_2 &= ZL_1(1 + \frac{I_{aL}}{I_{af}})C_a + (ZL_0 - ZL_1)\frac{A_a}{A_{a0}} C_{a0} \\ &\quad + Zm\frac{A_a}{A_{a0}} C_{a0} - \frac{V_a}{I_a} B_a \\ x_3 + jy_3 &= -\frac{V_a}{I_{af}} C_a \\ x_4 + jy_4 &= 3A_a \end{aligned}$$

식 (21)를 실수 부와 허수 부로 분리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1 p^2 + x_2 p + x_3 + x_4 R_f &= 0 \\ y_1 p^2 + y_2 p + y_3 + y_4 R_f &= 0 \end{aligned} \quad (22)$$

식 (22)에서 고장저항 R_f 를 소거하여 정리하면,

$$(x_1 - y_1 \frac{x_4}{y_4})p^2 + (x_2 - y_2 \frac{x_4}{y_4})p + (x_3 - y_3 \frac{x_4}{y_4}) = 0 \quad (23)$$

식 (23)에서 고장거리 p는 p에 관한 2차 근의 공식을 사용하여 구할 수 있다.

3. 알고리즘 시험 및 분석

본 논문에서 제시한 고장점 표정 알고리즘 1,2,3의 타당성을 검증하기 위하여 EMTP(Electro-Magnetic Transient Program)를 이용하여 그림 1과 같은 154[kV], 25[km] 병행 2회선 송전선로를 모의하였다. 알고리즘 시험 데이터는 고장 지점별 8가지, 고장 저항별 12가지로 96(8×12)가지를 생성하였으며, 알고리즘의 전압임피던스 변화에 대한 영향을 보기 위하여, 전원 SA의 내부임피던스 Z_a 를 분석 프로그램 상에서 0.5~1.5배수까지 20단계로 변화를 주면서 시험하였다. 따라서 알고리즘 별로 1920(8×12×20) 경우를 시험하였으며 결과는 그림 3, 4, 5와 같다. 오차는 전 체 선로길이에 대한 백분율로 나타내었다.

$$Error[\%] = \frac{\text{추정고장거리} - \text{실제고장거리}}{\text{전체선로길이}} \times 100$$

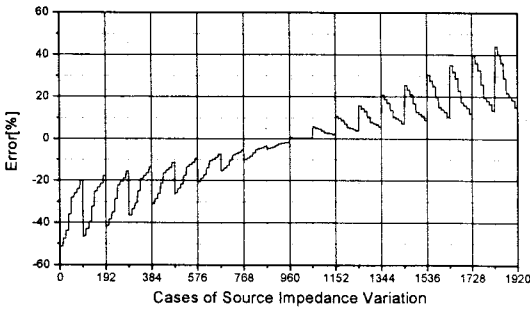


그림 3. 알고리즘 1의 결과

표 1. 알고리즘 1의 결과(정확한 전원임피던스 사용시)

구 분	고 장 지 점(PU)								
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.75	0.8	0.9	
고장저항 [Ω]	0	0.066	0.222	0.014	0.014	0.027	0.038	0.038	0.032
	2.5	0.390	0.302	0.257	0.196	0.163	0.164	0.153	0.127
	7	0.448	0.361	0.314	0.244	0.198	0.195	0.181	0.149
	7.5	0.466	0.378	0.332	0.259	0.209	0.205	0.190	0.156
	10	0.474	0.387	0.340	0.266	0.214	0.210	0.194	0.159
	15	0.482	0.395	0.348	0.273	0.219	0.215	0.198	0.162
	20	0.486	0.399	0.352	0.275	0.222	0.217	0.200	0.164
	30	0.490	0.403	0.356	0.280	0.224	0.219	0.202	0.165
	40	0.492	0.405	0.358	0.281	0.225	0.220	0.203	0.166
	50	0.493	0.406	0.359	0.282	0.226	0.221	0.204	0.167
	75	0.495	0.407	0.361	0.284	0.227	0.222	0.205	0.168
100	0.495	0.408	0.362	0.284	0.228	0.222	0.205	0.168	

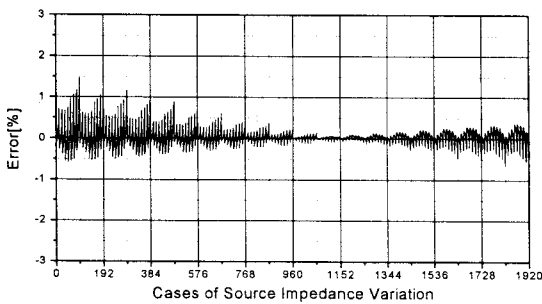


그림 4. 알고리즘 2의 결과

표 2. 알고리즘 2의 결과(정확한 전원임피던스 사용시)

구 분	고 장 지 점(PU)								
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.75	0.8	0.9	
고장저항 [Ω]	0	-0.024	-0.045	-0.065	-0.096	-0.114	-0.115	-0.116	-0.060
	2.5	0.001	0.002	0.002	0.003	0.005	0.005	0.006	0.007
	7	0.003	0.005	0.006	0.011	0.017	0.017	0.018	0.019
	7.5	0.004	0.006	0.008	0.014	0.021	0.021	0.023	0.024
	10	0.005	0.008	0.010	0.017	0.024	0.025	0.026	0.029
	15	0.007	0.011	0.013	0.022	0.031	0.031	0.034	0.037
	20	0.010	0.014	0.017	0.026	0.037	0.038	0.041	0.045
	30	0.015	0.019	0.023	0.035	0.049	0.050	0.054	0.061
	40	0.018	0.025	0.030	0.044	0.061	0.062	0.066	0.075
	50	0.022	0.030	0.036	0.053	0.072	0.072	0.078	0.088
	75	0.030	0.043	0.047	0.068	0.092	0.097	0.104	0.112
100	0.042	0.055	0.064	0.090	0.118	0.119	0.126	0.142	

그림 3과 표 1에서 알고리즘 1은 고장지점별 고장저항별, 전원단 임피던스 변화별 표정오차를 보여준다. 이 알고리즘은 전원단 임피던스가 정확할때는 오차가 적

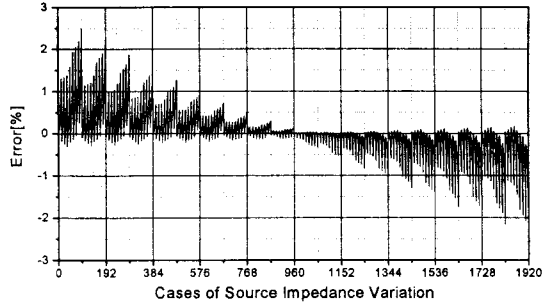


그림 5. 알고리즘 3의 결과

표 3. 알고리즘 3의 결과(정확한 전원임피던스 사용시)

구 분	고 장 지 점(PU)								
	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.75	0.8	0.9	
고장저항 [Ω]	0	-0.024	-0.045	-0.065	-0.096	-0.113	-0.115	-0.116	-0.058
	2.5	0.001	0.002	0.002	0.003	0.006	0.007	0.007	0.009
	7	0.003	0.005	0.006	0.011	0.017	0.018	0.019	0.022
	7.5	0.004	0.006	0.008	0.014	0.020	0.021	0.022	0.023
	10	0.005	0.007	0.009	0.015	0.022	0.023	0.024	0.025
	15	0.007	0.009	0.011	0.017	0.025	0.024	0.026	0.027
	20	0.008	0.010	0.011	0.017	0.023	0.023	0.024	0.025
	30	0.007	0.008	0.008	0.011	0.014	0.013	0.013	0.011
	40	0.003	0.002	0.000	-0.000	-0.004	-0.070	-0.008	-0.013
	50	-0.005	-0.007	-0.012	-0.019	-0.030	-0.036	-0.039	-0.048
	75	-0.033	-0.053	-0.067	-0.094	-0.130	-0.143	-0.152	-0.173
100	-0.107	-0.127	-0.152	-0.205	-0.270	-0.291	-0.308	-0.341	

지만 (최대 0.5%) 전원임피던스의 변화에 크게 영향을 받는 것으로 나타났다. 따라서 알고리즘 1은 전원임피던스에 대한 오차가 크기 때문에(최대 50%) 실제로 계통 구성과 발전량 부하량이 수시로 변동되는 상황에서는 사용하기가 곤란하다. 그러나 그림 4, 5와 표 2, 3에서와 같이 알고리즘 2와 3은 전원단 임피던스가 정확할때는 오차는 알고리즘 2는 최대 0.14%, 알고리즘 3은 최대 0.34%이고, 고장지점, 고장저항과 전원임피던스의 변화에 아주 작은 오차(알고리즘 2-최대 1.5%, 알고리즘 3-최대 2.5%)를 보이므로 성능이 아주 우수하다고 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 병행 2회선 송전선로에 1선 지락고장 발생 시에 고장점 표정에 영향을 주는 고장전류, 고장저항과 건전회선의 영상전류의 정보를 알 수 없기 때문에 전류분배계수를 구하는 방법과 이를 이용해서 3가지의 고장점 표정 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘에서 알고리즘 1, 2, 3이 모두 고장저항에는 영향을 받지 않는 것을 확인하였으며, 알고리즘 1은 전원 임피던스의 변화에 적용하지 못하고, 알고리즘 2, 3은 모든 계통의 변수에 영향받지 않고 아주 작은 오차를 나타내며 정확한 고장 거리를 표정하는 것을 사례연구 결과로 확인하였다. 계전기 설치점에서의 정보만을 사용하는 현 우리나라의 상황을 고려할 때 본 논문에서 개발한 알고리즘 2와 알고리즘 3은 고장점 표정에 있어서 아주 유용한 방법이라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] M.B.Djuric', Z.M.Radojevic' and V.V.Terzija, "Distance Protection and Fault Location Utilizing Only Phase Current Phasors", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No 4, pp. 1020-1026, October 1998