EMTP를 이용한 지중송전케이블의 부분방전 신호 전파특성 분석

Effects Analysis of Partial Discharge Signal Propagation Characteristics in Underground Transmission Cables Using EMTP

정 채 균[†] · 장 태 인^{*}
 (Chae-Kyun Jung · Tai-In Jang)

Abstract - This paper describes propagation characteristics obtained by considering semiconducting screen and cross-bonding in underground transmission cables. The semiconducting screen of power cable has effect on propagation characteristics including attenuation, velocity and surge impedance. However, it is very difficult to apply the semiconducting screen for EMTP model because of the number of conductors limitation. Therefore, CIGRE WG 21-05 proposed advanced insulation structure and analysis technique of simplified approach including inner and outer semiconducting screen. In this paper, the various propagation characteristics analyse using this structure and technique for 154kV XLPE 2000mm² cable. The frequency independent model of EMTP CABLE PARAMETER is used for just pattern analysis of propagation characteristics. For exact data analysis, the frequency dependent model of J-marti is used for EMTP modeling. From these result, various propagation characteristics of 154kV XLPE 2000mm² cable according to semi conducting screen consideration, frequency range, cable length and pulse width are analysed. In addition, in this paper, the effects of cross-bonding are also variously discussed according to cross-bonding methods, direct connection and impedance of lead cable.

Key Words : Cross-bonding, EMTP, Propagation characteristics, Semiconducting screen, Underground transmission cable

1. 서 론

전력케이블을 구성하고 있는 절연체 유전율과 반도전층은 주파수의존 특성이 강하며 케이블의 감쇠와 전파속도에 많은 영향을 미친다[1]. 또한 절연체의 유전율이 상대적으로 낮은 XLPE 절연케이블의 경우는 OF케이블에 비해 그 영향이 약하긴 하나 반도전층이 미치는 영향은 절연체 매질에 관계없이 크게 나타난다[2]. 따라서 전력케이블의 정확한 감쇠 및 전파특성을 분석하기 위해서는 반도전층이 포함된 개선된 절연체 구조의 모델을 이용해야 한다.

전력케이블을 EMTP로 모델링 할 경우 케이블의 내부 및 외부 반도전층은 EMTP의 CABLE PARAMETER로 표현하기에는 어려움이 있다. EMTP를 이용한 전력케이블 선로 정수 계산시 한 상당 도체 수를 최대 3개까지 입력할 수 있어 시스템을 내부반도전층으로 아모어를 시스템으로 간주하여 모델링 할 수 있으나 도체와 내부 반도전층사이에 가상의 절연층을 두어야 하므로 실제 특성과는 차이가 있을 수 있다. 따라서, CIGRE WG 21-05에서는 케이블의 반도전층을 EMTP 선로정수 계산 루틴에 적용할 수 있는 데이터 변환 방법을 제시하였다[2-4].

이를 바탕으로 지중배전케이블을 대상으로 반도전층을 고

려한 주파수 응답 및 전파특성 분석이 선행되었으며[5], 본 논문에서는 XLPE 2,000mm² 송전케이블의 정확한 전파특성을 분석하기 위해 XLPE 절연체 유전율의 주파수 의존특성 뿐만 아니라 반도전층을 고려한 전파특성을 분석하였다. 또한 배전케이블과는 달리 송전케이블이 갖고 있는 크로스본딩의 영향에 대해서도 분석하였다. 일반적으로 도체와 시스템으로 진행되는 진행파는 크로스본딩 지점에서 타상 시스템으로 전달되기 때문에 커패시턴스 변화가 발생하고 이로 인하여 특성 임피던스가 받는 영향이 크게 나타난다. 이로 인해 신호가 불규칙하며, 접속점이 임피던스 변곡점이 되어 각 접속점에서 다양한 투·반사의 영향이 나타나게 된다[6-7]. 따라서 본 논문에서는 특히 지중송전케이블에 적용되는 크로스본딩 방식이 부분방전신호의 전파특성에 미치는 영향에 대해서도 해석적 방법으로 분석하였다. 실질적으로 지중송전케이블 계통에서 나타나는 부분방전신호는 주로 접속점에서 발생하여 양방향으로 진행되는 특성을 보이나 본 논문에서는 3상 크로스본딩 방식에서 부분방전신호가 전파되는 특성분석만을 분석하기 위해 모델계통의 말단에서 부분방전신호를 주입하는 방식을 가정하여 검토하였다.

2. 전 파 특 성

전력케이블의 단위길이 당 저항 R, 인덕턴스 L, 커패시턴스 C, 누설 컨덕턴스 G로 정의 할 때, 임피던스 Z와 어드미턴스 Y는 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$Z = R + j\omega L \quad (1)$$

$$Y = G + j\omega C \quad (2)$$

[†] Corresponding Author : KEPCO Research Institute, Senior Researcher

E-mail : chekyun@kepri.re.kr

^{*} KEPCO Research Institute, Senior Researcher

Received : February 5, 2014; Accepted : April 10, 2014

여기서, 전파정수 γ 와 특성 임피던스 Z_c 는 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma = \sqrt{ZY} = \alpha + j\beta \quad (3)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{Z}{Y}} \quad (4)$$

식 (3)에서 전파정수의 실수분(α)은 전력케이블의 단위길이당 신호 감쇠의 정도를 나타내는 감쇠정수이며, 허수분(β)은 위상각 상수이다. 여기서, α 의 단위는 [Nepers/m]이며 이를 식 (5)와 같이 [dB/m]로 환산할 경우 8.686배를 하면 된다. 또한, 전력케이블 길이에 따라 감쇠되는 전압의 크기는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\alpha(\text{dB/m}) = \alpha \times 20 \log(e) \quad (5)$$

$$U = U_0 \times 10^{-\alpha(\text{dB/m}) \cdot L(m)/20} \quad (6)$$

한편, 케이블의 전파속도 v 는 위상각 상수 β 를 이용해 식 (7)과 같이 계산된다.

$$v = \frac{\omega}{\beta} [\text{m/s}] \quad (7)$$

식 (3) ~ (7)과 같이 전파정수, 즉 감쇠정수와 전파속도는 케이블 매질의 특성, 기하학적 구조, 주파수에 의존적임을 알 수 있다.

3. 반도체층이 전파특성에 미치는 영향

케이블의 반도체층은 전파속도 및 서지임피던스, 감쇠특성 등에 영향을 미친다. 그러나 EMTP의 CABLE PARAMETER 루틴은 반도체층의 명확한 표현이 불가능하다. 따라서 CIGRE WG 21-05에서는 케이블의 반도체층을 EMTP 선로정수 계산 루틴에 적용할 수 있는 데이터 변환 방법으로 Simplified Approach를 제시하였다[2-3]. Simplified Approach(SA)는 반도체층을 절연체로 간주하고 변화하는 커패시턴스 값에 따라 유전율을 재산정하는 방법으로 식 (8)과 같이 절연체 고유 유전율(ϵ_r : 2.3)을 바탕으로 절연층 자체의 커패시턴스를 계산하고 식 (9)와 같이 반도체층을 고려한 절연체 유전율을 다시 환산하게 된다.

본 논문에서는 154kV XLPE 2,000mm² 송전급 케이블을 이용해 SA 방식의 데이터 변환을 시행하였다.

$$C_{new} = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_r}{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)} \quad (8)$$

$$\epsilon_{r(new)} = \frac{C_{new} \times \ln\left(\frac{r_4}{r_1}\right)}{2\pi\epsilon_0} \quad (9)$$

여기서, r_1 은 그림 1과 같이 도체내부 반경, r_2 는 내부 반도체층까지의 반경, r_3 은 절연체까지의 반경, r_4 는 외부 반도체층까지의 반경이다.

그림 1 케이블 구조

Fig. 1 Cable structure

표 1에서는 식 (8)과 식 (9)를 이용해 XLPE 2,000mm²의 구 매규격을 바탕으로 한 커패시턴스와 환산 유전율을 나타내었다. 표에서처럼 XLPE 2,000mm²에서도 고유 유전율에 비해 상승한 2.899를 보였다.

표 1 XLPE 2,000mm² 케이블 규격에 의한 절연체 유전율 환산

Table 1 Revised insulation permittivity by XLPE 2,000mm² cable standard

Parameter	XLPE 2000mm ²	
	반경/두께	
도체반경[mm]	26.9	*커패시턴스[F/m] = 2.76579×10 ⁻¹⁰
내부반도체층두께[mm]	2	
절연층 두께[mm]	17	*환산유전율 = 2.899
외부반도체층두께[mm]	2.3	

본 논문에서는 XLPE 고유 유전율(반도체층 고려 無)과 SA 방식에 의해 변환된 환산 유전율(반도체층 고려 有)을 EMTP 모델링에 적용하여 송전케이블의 반도체층이 전력케이블의 신호 전파특성에 대해 다양하게 분석하였다. 이를 위해 주파수 영역은 1 kHz ~ 500 MHz로 하였으며, 반도체층 고려 유무, 즉 XLPE 고유 유전율과 환산 유전율 적용에 따른 전파특성을 아래와 같이 2개의 Case로 구분하여 비교 분석하였다. 본 논문에서는 참고문헌 [5]에서 CNCV 325 mm²를 대상으로 부분방전 신호의 전파특성을 실측값과의 비교분석을 통해 검증한 동일한 EMTP 모델링 기법을 적용하였다.

- Case 1 : XLPE 고유 유전율(반도체층 고려 無)
- Case 2 : SA 방식에 의해 변환된 환산 유전율

표 2는 154kV XLPE 2,000mm²를 대상으로 Case별 1 kHz ~ 500 MHz 영역에서 주파수 독립모델의 단일 계산 주파수에 따른 전파특성에 대한 계산결과이다. 표에서처럼 XLPE 2,000 mm²의 감쇠정수(dB/m)는 주파수가 상승할수록 증가하는 특성을 보이나, 전파속도와 서지임피던스는 1 MHz 이상의 주파수에서 일정한 값으로 수렴하게 된다. 1 MHz 이상

에서 전파속도의 경우 Case 1은 $197 \text{ m}/\mu\text{s}$, Case 2는 $175 \text{ m}/\mu\text{s}$, 또한 서지임피던스의 경우에서도 1 MHz 이상에서 Case 1은 $19.3 \text{ } \Omega$, Case 2는 $17.5 \text{ } \Omega$ 로 반도체층 고려 유무에 따라 차이가 발생하였다. 그러나 실제 계통을 EMTP 주파수 독립모델로 구성하여 모델링할 경우 1 MHz 이상의 영역에서는 임피던스 Matrix 계산 과정에서 에러가 발생하는 오류가 있다. 즉, 주파수 독립모델에서 분석한 고주파수 영역의 결과는 주파수별 케이블 전파특성의 경향분석 용도로만 활용할 수 있으며, 계산결과를 실제값으로 보기는 어려울 것으로 사료된다.

표 2 EMTP를 이용해 계산한 Case별 계산 주파수에 따른 전파특성

Table 2 Propagation characteristics according to calculation frequency using EMTP in each case

선로정수 계산 주파수	감쇠정수 [dB/m]		전파속도 [m/ μs]		서지임피던스 [Ω]	
	Case1	Case 2	Case1	Case2	Case1	Case2
1 kHz	0.0204	0.0229	185.85	165.51	20.54	18.34
10 kHz	0.0637	0.0715	193.13	172.00	19.81	17.65
100 kHz	0.2038	0.2289	196.22	174.75	19.51	17.37
1 MHz	0.6473	0.7269	197.21	175.63	19.41	17.28
10 MHz	2.0499	2.3018	197.53	175.91	19.38	17.26
20 MHz	2.8996	3.2559	197.57	175.95	19.37	17.25
30 MHz	3.5516	3.9880	197.59	175.97	19.37	17.25
100 MHz	6.4853	7.2823	197.63	176	19.37	17.25
500 MHz	14.503	16.285	197.66	176.03	19.37	17.25

그림 2는 Case 2, XLPE 2,000mm² 주파수에 따른 감쇠전압의 크기에 대한 EMTP 해석결과이다. 감쇠전압 크기 분석을 위해 1상 케이블을 대상으로 모델링 하였으며 입력전압은 1 V 로 하였고, 출력단은 정합저항으로 정합하였다. 그림에서처럼 케이블 길이가 길수록 출력단에 도달하는 전압신호의 감쇠가 크게 나타남을 알 수 있다.

그림 3은 Case 2에서 케이블 종류별 주파수에 따른 감쇠정수(dB/m)를 비교하여 나타내었다. 그림에서처럼 감쇠정수는 케이블의 굵기가 커질수록 그 값이 낮아지는 것을 알 수 있다. 즉 케이블에서 감쇠와 서지임피던스는 도체 굵기

그림 2 XLPE 2,000mm² 주파수에 따른 감쇠전압(Case 2)

Fig. 2 Attenuation voltage according to frequency of XLPE 2,000mm²

가 증가할수록 줄어드는 특성을 가지고 있다.

다음으로 본 논문에서는 위에서 언급한 주파수 독립모델의 단점을 개선하기 위해 EMTP CABLE PARAMETER의 주파수 의존모델(J-Marti)을 통해 선로정수를 계산하고 케이블 전파특성을 모델링 하였다. 주파수 의존모델(J-Marti)을 통한 EMTP 모델링 조건은 아래와 같다.

- 최대 주파수 : 500MHz
- 케이블 종류 : 154kV XLPE 2,000mm²
- 케이블 길이 : 100m, 1km, 1.5km, 2km, 5km, 10km
- 입력펄스 폭 : 15ns, 20ns, 30ns, 100ns, 1 μs , 10 μs , 100 μs
- 검토 Case : Case 1, Case 2

그림 3 케이블 종류별 주파수에 따른 감쇠정수(dB/m)(Case 2)

Fig. 3 Attenuation constant according to kinds of cables

그림 4는 XLPE 2,000mm² 100 m 케이블에 대한 EMTP 모델링을 통한 해석 결과이다. 여기서, 케이블에서 발생하는 반사파의 영향을 최소화하고 감쇠되는 크기를 정확히 분석하기 위해 케이블 말단은 정합저항으로 정합하였다. 각 분석 Case의 입력 신호 전압은 1 V 이다.

그림 4에서처럼 부분방전 펄스 폭 20 ns 이하에서 Case 1의 경우 0.91 V , Case 2에서는 각각 0.5 V 로 신호가 감쇠되었으며, 펄스 폭이 길어질수록 부분방전 펄스신호 감쇠에 의한 영향은 줄어든다. 또한 전파속도의 경우 말단 까지 도달시간이 Case 1과 Case 2에서 각각 $0.53 \mu\text{s}$ 와 $0.596 \mu\text{s}$ 였으며, 전파속도는 Case 1에서는 $188.68 \text{ m}/\mu\text{s}$, Case 2에서는 식 (10)과 같이 각각 $167.7 \text{ m}/\mu\text{s}$ 로 분석되었다.

$$\text{Case 2 : } v = \frac{100\text{m}}{0.596\mu\text{s}} = 167.7\text{m}/\mu\text{s} \quad (10)$$

표 3에서는 XLPE 2000mm² 케이블길이(100m, 1km, 2km, 5km, 10km)에서 부분방전 신호 감쇠 특성을 Case별로 비교하였다. 표에서 Case 1은 XLPE 고유 유전율을 사용한 경우이며, Case 2는 SA 방식에 의해 변환된 환산 유전율을 사용한 경우이다. 표에서처럼 케이블 길이별 부분방전 펄스 폭 20 ns 이하에서 Case 1에 비해 Case 2에서의 감쇠가 크게 나타나며, 펄스 폭이 길어질수록 부분방전 펄스신호 감쇠에 의한 영향은 줄어든다.

(a) 부분방전 펄스폭(15ns)

(b) 부분방전 펄스폭(20ns)

(c) 부분방전 펄스폭(30ns)

(d) 부분방전 펄스폭(100ns)

(e) 부분방전 펄스폭(1μs)

(f) 부분방전 펄스폭(10μs)

그림 4 펄스 감쇠 및 전파속도 특성 해석 결과

Fig. 4 Analytical results on pulse attenuation and propagation velocity

4. 크로스본딩이 전파특성에 미치는 영향

본 논문에서는 그림 5와 같이 두 개의 크로스본딩 대구간이 있는 계통의 A S/S A상에 부분방전 펄스 신호를 인가하고 B S/S의 A상은 정합 또는 개방하는 방식으로 모의 계통을 구성하여 크로스본딩 시스템에서의 전파특성을 분석하였다.

일반적으로 지중송전케이블 계통에서는 주로 접속함에서

부분방전이 발생하며 발생지점을 중심으로 양방향으로 진행하는 특성을 보인다. 따라서 실질적인 부분방전 현상 모의를 위해서는 중간접속부에서 부분방전 신호를 발생시키는 것이 일반적이거나 본 논문에서는 3상 크로스본딩 방식에서 부분방전신호가 전파되는 특성을 분석하기 위한 목적이 크므로 그림 5의 모의계통에서 선로 말단인 A S/S의 A상에 부분방전신호를 주입하는 방식으로 가정하였다.

표 3 XLPE 2,000mm² 신호 감쇠 특성 비교Table 3 Comparison of signal attenuation of XLPE 2,000mm²

펄스 폭	케이블 길이									
	100m		1km		2km		5km		10km	
	Case 1 [V]	Case 2 [V]	Case 1 [V]	Case 2 [V]	Case 1 [V]	Case 2 [V]	Case 1 [V]	Case 2 [V]	Case 1 [V]	Case 2 [V]
15ns	0.9106	0.5012	0.53	0.53	0.3293	0.2651	0.1584	0.1369	0.064	0.0535
20ns	0.9106	0.5012	0.53	0.53	0.3293	0.2651	0.1584	0.1369	0.064	0.0535
30ns	0.971	0.9336	0.708	0.7612	0.5198	0.5288	0.2667	0.2396	0.1215	0.1016
100ns	0.9832	0.9813	0.9098	0.9027	0.8327	0.8171	0.6232	0.5759	0.3294	0.2854
1μs	0.9855	0.9842	0.9641	0.9602	0.9404	0.9334	0.8691	0.8525	0.7536	0.7258
10μs	0.9891	0.9878	0.9717	0.9696	0.9638	0.9611	0.9419	0.9356	0.9062	0.8963
100μs	0.9906	0.9895	0.9846	0.9827	0.9782	0.9755	0.9569	0.9489	0.9297	0.9241

그림 5 크로스본딩 시스템 모의 계통도

Fig. 5 Cross-bonding system diagram

또한 크로스본드 리드선의 영향을 분석하기 위해 참고문헌 [8]에 의해 리드선 인덕턴스는 1 uH/m를 적용하였으며 부분방전 펄스신호의 크기는 1 V, 펄스 폭은 20 ns, 각 접속함간 거리는 100 m로 가정하였다. 일반적으로 케이블 접속함간 거리는 300m 이나 본 논문에서는 크로스본딩 되어 있는 접속함에서 부분방전 신호의 투·반사가 전파특성에 미치는 영향을 분석하고자 각 접속함간의 거리를 최소화 하였다.

아울러, 크로스본드 리드선의 영향 분석을 위해 2개의 검토 Type를 가정하였으며, EMTP 선로정수는 위에서 검증된 SA 방식에 의해 변환된 환산유전율을 적용한 주파수 의존 모델(J-marti)을 사용하였다.

- Type 1 : 크로스본딩 (크로스본드 리드선 인덕턴스 : 1 uH/m)
- Type 2 : 크로스본딩 (크로스본드 리드선 인덕턴스 : 1 uH/m)
- 크로스본드 리드선 과 병렬로 리드선 직결

일반적으로 접속함에서의 특성임피던스는 케이블 본선의 특성임피던스에 비해 크므로 진행파의 투·반사 현상이 나타나게 되는 특성이 있습니다. 그림 7에서는 케이블 본선 구간과 접속함의 단면도를 각각 나타내었다. 여기서 그림 7(a)의 케이블 본선을 나타낸 것으로 ①는 도체, ②는 절연체, ③는 시스, ④는 방식층을 의미한다. 여기서 본선의 커패시턴스와 인덕턴스 특성임피던스의 계산식은 식 (11) ~ 식 (13)과 같다.

$$L_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \log\left(\frac{r_{a2}}{r_{a1}}\right) \quad (11)$$

$$C_1 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_s}{\log\left(\frac{r_{a2}}{r_{a1}}\right)} \quad (12)$$

$$Z_1 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (13)$$

(a) Type 1

(b) Type 2

그림 6 타입별 크로스본딩 결선도

Fig. 6 Cross-bonding diagram in each Type

(a) 케이블 본선

(b) 접속함

그림 7 케이블 본선 구간과 접속함의 단면도

Fig. 7 Diagram of cable and joint box

또한 그림 7(b)와 같은 케이블 접속함의 커패시턴스와 인덕턴스 특성임피던스의 계산식은 식 (14) ~ 식 (16)과 같다.

$$L_2 = \frac{\mu_0}{2\pi} \log\left(\frac{r_{b2}}{r_{b1}}\right) \quad (14)$$

$$C_2 = \frac{2\pi\epsilon_0\epsilon_s}{\log\left(\frac{r_{b2}}{r_{b1}}\right)} \quad (15)$$

$$Z_2 = \sqrt{\frac{L_2}{C_2}} \quad (16)$$

여기서,

μ_0 : 공기중의 투자율, ϵ_0 : 공기중의 유전율, ϵ_s : 절연체 비유전율, r_{a1} : 케이블 본선 도체 반경, r_{a2} : 케이블 본선 절연체 반경, r_{b1} : 케이블 접속함 도체 반경, r_{b2} : 케이블 접속함 절연체 반경, L_1 : 케이블 본선 인덕턴스, C_1 : 케이블 본선 커패시턴스, Z_1 : 케이블 본선 특성임피던스, L_2 : 케이블 접속함 인덕턴스, C_2 : 케이블 접속함 커패시턴스, Z_2 : 케이블 접속함 특성임피던스 이다.

식 (14) ~ (16)에서 ' $r_{b2} \gg r_{a2}$ ' 이므로 접속함에서 인덕턴스(L_2)는 본선의 인덕턴스(L_1)에 비해 큰 반면에 접속함의 커패시턴스(C_2)는 본선의 커패시턴스(C_1)에 비해 작다. 따라서 접속함에서의 특성임피던스(Z_2)는 케이블 본선의 특성임피던스(Z_1)에 비해 크므로 이 부분에서 두 특성임피던스에 의한 투과계수, 반사계수의 비율만큼 진행파의 투과·반사 현상이 나타난다.

그림 8은 크로스본드 리드선 인덕턴스 1 uH/m를 적용한 Type 1에 대한 해석 결과이다. 그림에서처럼 크로스본드 리드선에 의해 접속부는 변이점이 되어 투과, 반사에 의한 영향이 나타나며, 개방시에는 정의 반사파가, 정합시에는 부의 반사파가 나타나고 있다. 아울러, 신호의 크기는 개방시의 경우 약 2배가 됨을 알 수 있다. 이처럼 크로스본딩이 되어

(a) B S/S Termination 정합

(b) B S/S Termination 개방

그림 8 Type 1해석 검토 결과

Fig. 8 Analysis results of Type 1

있는 송전케이블에서 부분방전 펄스신호의 전파특성은 접속함에서의 임피던스 변이에 의해 신호가 소멸될 때까지 투·반사를 반복함에 따라 부분방전 전파특성 분석이 어려움을 알 수 있다.

그림 9는 Type 2에 대한 해석 결과이다. Type 2는 1 uH/m의 인덕턴스를 가진 크로스본드 리드선을 이용해 정상적으로 크로스본딩을 하고 이와 병렬로 인덕턴스를 고려하지 않은 리드선으로 각 상의 시스를 직결한 경우를 예로 든 것이다. 이는 지중 송전케이블에서 부분방전 펄스신호 분석을 위해 케이블 접속부의 크로스본딩을 유지한 상태에서 매우 낮은 저항을 갖는 굵은 도체를 이용해 시스를 병렬로 직결하는 경우를 가정할 수 있다. 이 경우 그림에서처럼 접속부에서는 임피던스 변이가 발생하지 않으며, 케이블 말단에서만 반사의 영향이 나타난다. 따라서, 크로스본딩이 되어있는 지중송전케이블에서 부분방전 펄스신호에 의한 전파특성 분석시 접속함에서 나타나는 임피던스 변이를 최소화하기 위해 측정시 접속함을 저저항 도체로 직결하는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

(a) B S/S Termination 정합

(b) B S/S Termination 개방

그림 9 Type 2 해석 검토 결과

Fig. 9 Analysis results of Type 2

5. 결 론

1) 154kV XLPE 2,000mm² 케이블의 전파특성 분석을 위해 XLPE 고유 유전율과 환산 유전율 적용에 따라 2개 Case로 구분하였다. 먼저 주파수 독립모델의 단일 계산 주파수에 따른 전파특성을 1 kHz ~ 500 MHz의 주파수 범위에서 분석하였다. 반도체층을 고려하지 않은 경우(Case 1) 전파속도는 반도체층을 고려한 경우(Case 2)에 비해 빠르게 나타났

으며 1 MHz 이상의 주파수에서 일정한 값으로 수렴하게 된다. 아울러, 반도체층 고려 유무에 따른 차이도 크게 발생하였으며, 케이블 길이가 길수록 출력단에 도달하는 전압신호의 감쇠가 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 실제 계통을 EMTP 주파수 독립모델로 구성하여 모델링할 경우 1 MHz 이상의 영역에서는 임피던스 Matrix 계산 과정에서 에러가 발생하는 오류가 있다. 즉, 주파수 독립모델에서 분석한 고주파수 영역의 결과는 주파수별 케이블 전파특성의 경향분석 용도로만 활용할 수 있으며, 계산결과를 실제값으로 보기는 어려울 것으로 사료된다.

2) 따라서, 본 논문에서는 케이블 전파특성 모델 수립을 위해 EMTP CABLE PARAMETER의 주파수 의존모델(J-Marti)을 사용하였다. 펄스 폭 20 ns 이하에서 Case 1의 경우 0.91 V, Case 2에서는 각각 0.5V로 신호가 감쇠되었으며, 펄스 폭이 길어질수록 펄스신호 감쇠에 의한 영향은 줄어든다. 아울러, 전파속도는 Case 1에서는 188.68 m/ μ s, Case 2에서는 167.7 m/ μ s로 분석되었다.

3) 지중송전케이블에서 크로스본드 리드선의 영향 분석 결과 리드선 인덕턴스(1 uH/m) 및 크로스본딩 자체가 접속부에서 변이점이 되며 투과, 반사에 의한 영향이 나타나게 된다. 즉, Type 1은 B/S/S 개방시에는 정의 반사파가, 정합시에는 부의 반사파가 나타남을 알 수 있으며, 크로스본딩 뿐 아니라 리드선의 인덕턴스에 의해 접속부에서는 임피던스 변이가 발생하게 된다. 따라서 부분방전 펄스신호의 전파특성은 접속함에서의 임피던스 변이에 의해 신호가 소멸될 때까지 투·반사를 반복하며 부분방전 전파특성을 분석이 어려워진다. 그러나 Type 2의 접속부에서는 임피던스 변이가 발생하지 않으며, 케이블 말단에서만 반사의 영향이 나타남을 알 수 있다. 따라서, 크로스본딩이 되어있는 지중송전케이블에서 부분방전 전파특성 분석시 크로스본딩을 유지한 상태보다는 접속함에서 나타나는 임피던스 변이를 최소화하기 위해 측정시 저저항 도체로 접속함을 접속함을 직결하는 방안이 효과적일 것으로 사료된다. 여기서 부분방전신호는 선로말단에서 주입하는 것으로 가정하였다.

이와 같이 본 논문에서 검토한 지중송전케이블의 부분방전 전파특성 분석결과는 TDR(Time Domain Reflectometer)와 같이 진행파를 이용한 부분방전 신호 검출 및 위치 추정 기법에 적용될 예정이며 본 논문의 연구결과를 기반으로 새로운 부분방전 검출법 개발을 위해 지속적인 연구를 진행할 예정입니다.

References

- [1] Mustafa Kizilcay, "Modelling of a 400kV XLPE cable by taking into consideration the semi-conducting layer of core", 2001 EEUG Meeting Proceedings
- [2] Bjorn Gustavsen, "Panel on Data for Modeling System Transients -Insulated Cables", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting Proceedings, Vol. 2, 2001
- [3] Bjorn Gustavsen, "The effect of lossy insulation (paper-oil) and semiconductive layers on wave propagation in cables", CIGRE WG 21-05, SINTEF Energy Research
- [4] G. Mugula, R. Eriksson, "High Frequency Characteristics of a Shilded Medium Voltage XLPE Cable" Conference on Electrical and Dielectric Phenomena, 2001 Annual Report
- [5] Chae-Kyun Jung, -Beom Lee, Jeong-Tae Kim, "Analysis of Frequency Response Characteristic considering Semiconducting Screen in Underground Distribution Cables", The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers Vol. 61, No. 8, 2012
- [6] C. K. Jung, J. W. Kang, H. S. Park, J. W. Park, T. I. Jang, D. I. Lee, "Pattern Analysis for Underground Cable Fault Location Through TDR Tests", 2011 The Korean Institute of Electrical Engineers Spring Annual Conference Proceedings, 2011.
- [7] C. Y. Ahn, J. B. Lee, C. K. Jung, "Analysis Evaluation of PD Considering Cross-Bonding in Underground Power Cable System", 2012 The Korean Institute of Electrical Engineers Summer Annual Conference Proceedings, 2012. 7
- [8] IEEJ, "'Surge Phenomena of Underground Cable Systems'", Technical Report of IEEJ, Apr. 1991.

저 자 소 개

정 채 군 (鄭彩均)

1999년 원광대 공대 전기공학과 졸업.
2002년 원광대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사).
2006년~2007년 독일 University of Siegen, Post-doc 연구원.
2007년 ~ 현재 한전전력연구원 송변전연구소 선임연구원

E-mail : chekyun@kepri.re.kr

장 태 인 (張太因)

1990년 한양대 전기공학과 졸업. 1994년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사).
1994년 ~ 1996년 삼성SDS 근무. 1996년 ~ 현재 한전전력연구원 송변전연구소 선임연구원

E-mail : angeljti@kepri.re.kr