

EMTDC를 이용한 전기철도 급전계통의 고조파 해석에 관한 연구

이한민* 한문섭 오광해 이장우 박현준
한국철도기술연구원

A study on Harmonic Analysis of Electric Railway System Using EMTDC

H.M. Lee M.S. Han K.H. Oh C.M. Lee H.J. Park
Korea Railroad Research Institute

Abstract - The magnified current harmonics usually brings about various problems. That is, the current harmonics makes interference in the adjacent lines of communications and the railway signalling system. Furthermore, in case it flows on the side of power system, not only overheating and vibration at the power capacitors but also wrong operation at the protective devices can occur. Therefore, the exact assessment of the harmonic current flow must be undertaken at design and planning stage for the electric traction systems. From these point of view, this study presents the harmonic analysis and the modelling of traction power feeding system focused on the amplification of harmonic current.

1. 서 론

전철급전시스템은 변압기, 전차선, 급전선, 레일 및 보호선 등 일련의 전력설비와 이들을 유기적으로 결합시키고 효율적으로 운용, 관리하기 위한 운용설비로 구성되어 있다. 이러한 전철급전시스템은 일반 전력계통에 비해 부하의 특성이나 계통구성 형태 및 제반 현상측면에서 상이한 특징을 가진다. 특히, 최근에 도입된 전철구동시스템에는 컨버터와 인버터가 포함되어 있으며 위상제어 및 펄스폭변조방식에 의하여 제어되기 때문에 고조파를 발생시킨다.

전기전인차량에서 발생하는 고조파전류는 급전계통의 임피던스 특성에 의해 특정 조파에서 공진되어 고조파전류 확대현상을 일으켜 각종 문제를 야기시킬수 있다. 즉, 고조파전류는 인접통신선의 유도장애를 일으키고 철도 신호장애의 원인이 될 뿐만 아니라 전원계통에 유입되는 경우에는 전력용콘덴서의 과열/진동을 유발시키고 보호계전기를 오동작 시킬 우려가 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 고조파 해석모델을 구성하고 급전거리 및 차량 위치 변화에 따른 고조파 해석을 하였다.

2. 고조파 해석 모델

전형적인 교류 급전회로에서 주행하는 전기차량은 전차선, 레일사이에서 전력이 공급되어서 주행하지만, 교류 급전회로에서는 약 10km 마다에 AT가 설치되어 있어서 전기차에서 발생하는 고조파전류는 전차선, 레일을 지나서 부근의 AT에 의해 전차선, 급전선의 전류로서 변전소에 흐르게 된다. 이 때문에 여기서는 왕복선로분포정수회로로서

검토한다. 다음 그림 1.에 표시한 급전회로에 고조파발생원(전기차)에 의해 급전회로에 흐르는 고조파전류의 공진주파수, 확대율 등을 구한다.

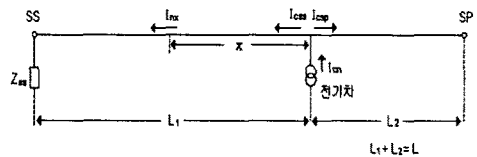


그림 1. AT 급전회로에 대한 선로분포정수회로

3. 공진주파수

고조파발생원(전기차)의 위치에서 변전소측을 본 급전회로의 임피던스를 Z_1 이라 하고 급전선로말단측을 본 급전회로의 임피던스를 Z_2 라 하면

$$Z_1 = Z_0 \frac{Z_{ss} \cosh \gamma \ell_1 + Z_0 \sinh \gamma \ell_1}{Z_0 \sinh \gamma \ell_1 + Z_0 \cosh \gamma \ell_1} (\Omega) \quad (1)$$

$$Z_2 = Z_0 \coth \gamma \ell_2 (\Omega)$$

여기서, $Z_0 = \sqrt{\frac{Z}{Y}}$: 급전선로측의 특성임피던스 (Ω)

$\gamma = \sqrt{Z \cdot Y}$: 급전선로측의 전파정수

Z_{ss} : 급전용 변압기의 임피던스와 전원측 임피던스의 합 (Ω)

Z_1 과 Z_2 는 고조파전원에 대하여 병렬회로를 구성하므로 그 병렬임피던스 Z_p 는

$$Z_p = \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2} = \frac{Z_0 \cosh \gamma (\ell_1 - \ell_2) \cdot (Z_{ss} \cosh \gamma \ell_1 + Z_0 \sinh \gamma \ell_1)}{Z_0 \sinh \gamma \ell_1 + Z_0 \cosh \gamma \ell_1} (\Omega) \quad (5)$$

이다. 식 (2)에 대해서 분모 = 0 일 때, 즉

$$Z_{ss} \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell = 0 \quad (3)$$

또는

$$Z_{ss} + Z_0 \coth \gamma \ell = 0 \quad (4)$$

인 조건에서 급전회로는 공진상태이며, 전기차에서 발생하는 고조파전류의 확대현상이 생긴다. 또한 공진주파수는 전기차 위치 (ℓ_1, ℓ_2)에 무관하다.

4. 고조파공진에 따른 확대율

그림 1.에서 전기차에 의해 발생한 고조파전류를 $I_{CN}(A)$, SS방향으로 흐르는 고조파전류를 $I_{CSS}(A)$, SP방향으로 흐르는 고조파전류를 $I_{CSP}(A)$ 라 하면

$$I_{cs} = I_{cs} \cdot \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2} = I_{cs} \cdot \frac{(Z_s \sinh \gamma \ell_1 + Z_0 \cosh \gamma \ell_1) \cosh \gamma \ell_2}{Z_s \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell} \quad (5)$$

이다. 이 I_{CSS} 를 송전단 고조파전류로 삼고 수전단인 SS의 임피던스를 Z_{SS} 로 두면 전기차로부터 x 만큼 떨어진 지점의 고조파전류 $I_{NX}(A)$ 는

$$I_{nx} = I_{cs} \cdot \frac{Z_s \sinh \gamma (\ell_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma (\ell_1 - x)}{Z_s \sinh \gamma \ell_1 + Z_0 \cosh \gamma \ell_1} \quad (6)$$

이다. 식 (5)을 식 (6)에 대입하면

$$I_{nx} = I_{cs} \cdot \frac{\cos \gamma \ell_2 (Z_s \sinh \gamma (\ell_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma (\ell_1 - x))}{Z_s \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell} \quad (7)$$

이다. 여기서 고조파 확대율 $K(p.u.)$ 을 I_{NX}/I_{CN} 라고 두면

$$K = \frac{\cosh \gamma \ell_2 (Z_s \sinh \gamma (\ell_1 - x) + Z_0 \cosh \gamma (\ell_1 - x))}{Z_s \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell} (p.u.) \quad (8)$$

가 얻어진다. 식 (8)은 ℓ_1 위치의 전기차가 발생하는 고조파전류에 의해 전기차에서 SS간의 임의의 위치 x 에 있어서 고조파전류의 확대율을 나타낸 것이다. 이제 고조파전류 I_{NX} 가 최대가 되는 전기차의 위치를 구한다. 우선 전기차에서 SS방향으로의 고조파전류 I_{CSS} 가 최대가 되는 위치는 $\ell_2 = 0$, 즉 전기차가 SP에 있는 경우로서 이것을 $I_{CSS} = I_{SP}$ 라 두면

$$I_{nx} = I_{sp} \cdot \frac{Z_s \sinh \gamma (\ell - x) + Z_0 \cosh \gamma (\ell - x)}{Z_s \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell} \quad (9)$$

이 된다. 다음에 식 (9)에서 얻어진 급전회로의 공진조건은 식 (4)과 같이 표시되므로 이것을 변형하면

$$\gamma \ell = \tanh^{-1} \left(-\frac{Z_0}{Z_s} \right) = -\theta, \quad (10)$$

이 된다. 즉, 공진시 $\gamma \ell$ (γ 는 공진고조파차수값, ℓ 은 급전거리에서 제공하는 정수)는 (-)의 일정한 값이다. 그러므로 식 (9)의 $\sinh(\gamma \ell - \gamma x)$ 및 $\cosh(\gamma \ell - \gamma x)$ 는 x 가 크면 클수록 I_{NX} 도 커진다. 식 (9)에서 $x = \ell$, $I_{NX} = I_{SS}$ 로 두면

$$I_{ss} = I_{sp} \cdot \frac{Z_0}{Z_s \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell} \quad (11)$$

이다. 따라서 SS에 있어서 확대율 K 는

$$K = \frac{I_{ss}}{I_{sp}} = \frac{Z_0}{Z_s \sinh \gamma \ell + Z_0 \cosh \gamma \ell} (p.u.) \quad (12)$$

이 된다.

이상으로 교류 급전회로에 있어서는 공진고조파 전류의 가장 큰 값 또는 확대율의 가장 큰 값은 전기차가 SP점에 위치할 때 발생하며, 그 전류를 SS 점에서 관측한 경우인 것이다.

5. 고조파 차량 모델링

철도급전시스템의 주된 고조파 발생원은 차량이고, 차량에서 발생된 고조파는 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다. 이 경우 차량의 고조파 전류원에 대한 모델을 EMTDC를 이용하여 다음 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.



그림 2. 고조파 차량

차량 내부의 세부 모델은 전류원으로 모델링 하여 각 조파별로 고조파 전류를 주입하는 것으로 하였다. 그림에서 볼 수 있듯이 사용자가 원하는 고조파 차량 모델로 3조파에서 49조파까지 고조파 전류를 입력할 수 있도록 하였다.

이렇게 차량을 모델링 하고 전철 급전시스템에 차량을 첨가하여 고조파 해석을 하였다. 전철 급전시스템은 한 전으로부터 전력을 공급받아 전철 주변압기를 통해 M상과 T상으로 공급하는데 그림 3.에서는 M상만 그림으로 나타내었다. 보조구분소와 급전구분소는 전철변전소에서 각각 10km씩 떨어져 있는 것으로 하였다.

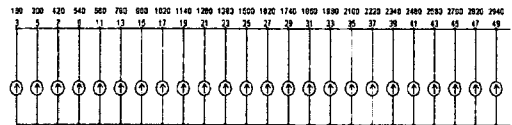


그림 4. 차량내부의 고조파 입력 소스

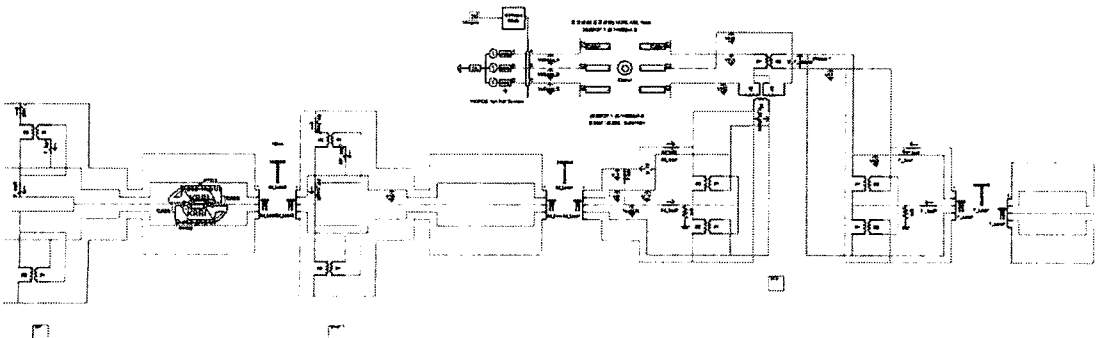


그림 3. 전철 급전시스템 (M상)

6. 사례 연구

도시철도 교류 급전시스템의 고조파 공진특성을 분석하기 위해 가장 특징적인 현상인 고조파 확대율을 검토하였다.

교류 급전시스템에서는 차량의 컨버터에서 발생된 고조파전류가 전차선로를 따라 전철변전소를 통하여 전원계통쪽으로 유입되는데, 고조파 확대율은 차량의 고조파 발생전류에 대한 변전소 유입고조파 전류로 정의된다. 전체 급전계통의 선로정수는 주파수의 함수이므로 고조파 확대율은 각 조파(1, 3, 5...)에서 서로 다른 값을 갖는다. 따라서 고조파 확대율은 조파별로 계산되어야 하며 고조파 확대율이 최대인 주파수를 공진주파수라고 한다. 도시철도 교류 급전시스템의 고조파 확대율 계산 결과를 다음 그림 5에 보인다.

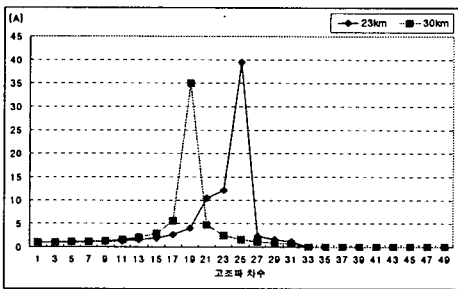


그림 5. 도시철도 교류 급전시스템의 고조파 확대율

그림으로부터 고조파 공진특성을 정리하면, 급전거리가 상대적으로 큰 쪽이 작은 쪽보다 저차에서 공진이 발생되었으며 그 확대율은 급전거리가 상대적으로 작은 쪽이 더 크게 계산되었다. 이런 추이는 종래의 문헌에서와 동일한 결과로써, 급전거리가 길수록 고조파 전류확대율은 작아지나 저차조파에서 공진이 발생되어 신호 계통등의 장애가능성이 커짐을 말해주고 있다.

4. 질에서 설명한 것처럼 차량의 위치가 급전구분소에 위치할 때 고조파 전류확대율값이 가장 크게 나타난다는 것을 증명하였다.

따라서 EMTDC를 이용하여 차량의 위치를 변경해 가면서 고조파 확대율값과 그 때의 전압왜형율을 시뮬레이션하였다.

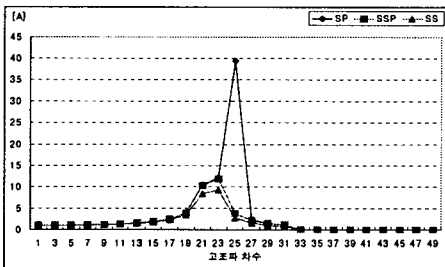


그림 6. 차량 위치에 따른 고조파 확대율

위에서 증명된 이론과 동일하게 차량의 위치를 변경해 가면서 한전전력 인출점에서 전압왜형율을 살펴보았다. 이 때도 차량이 급전구분소에 위치할 때 고조파 전류확대율값이 가장 크게 나타났다. 또한 고조파 전압왜형율

을 표 1과 그림 7로 나타내었다.

이것을 표와 그림으로 나타내었다. 이 결과는 고조파 규제치 IEEE 519규격에 의해 1.5%를 넘지 않으므로 본 계통에서는 고조파 문제가 없을 것으로 판단된다.

표 1. 차량 위치에 따른 전압왜형율

	A상 [%]	B상 [%]	C상 [%]
변전소	0.01228	0.26780	0.26790
보조구분소	0.01232	0.30880	0.30900
급전구분소	0.01238	0.32110	0.32130

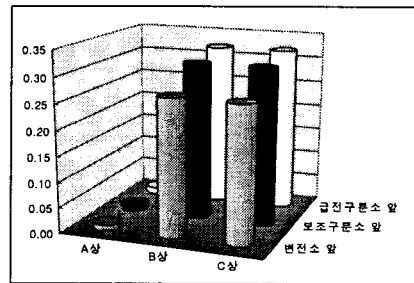


그림 7. 차량 위치에 따른 전압왜형율

7. 결론 및 향후 연구계획

본 논문에서는 이러한 고조파 해석모델을 구성하고 급전거리 및 차량 위치 변화에 따른 고조파 해석을 하였다.

철도급전시스템의 주된 고조파 발생원은 차량이고, 차량에서 발생된 고조파는 전차선로의 레일과 전차선 사이에서 주입되는 전류원으로 취급할 수 있다. 이 경우 차량의 고조파 전류원에 대한 모델을 EMTDC를 이용하여 나타내었다.

급전거리가 상대적으로 큰 쪽이 작은 쪽보다 저차에서 공진이 발생되었으며 그 확대율은 급전거리가 상대적으로 작은 쪽이 더 크게 계산되었다. 급전거리가 길수록 고조파 전류확대율은 작아지나 저차조파에서 공진이 발생되어 신호 계통등의 장애가능성이 커짐을 말해주고 있다.

EMTDC를 이용하여 차량의 위치를 변경해 가면서 고조파 확대율값과 그 때의 전압왜형율을 시뮬레이션한 결과 고조파 전류확대율값과 전압왜형율이 가장 크게 나타났다.

[참고 문헌]

- (1) 오광해, 이한민, 이상훈, "경부고속철도 시험선로의 고조파 해석을 위한 10단차 회로망 모델", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계분문학술대회 논문집, pp.429-432, 2001.4
- (2) Yoshifumi Mochinaga, "Higher Harmonics Resonance on AT Feeding Circuit and Countermeasures to Suppress it", T.IEE Japan, Vol. 114-D, No. 10, 1994
- (3) Joachim Holtz and Heinz-jürgen Klein, "The Propagation of Harmonic Currents Generated by Inverter-Fed Locomotives in the Distributed Overhead Supply System", IEEE Transactions on Power Electronics, Vol. 4, No. 2, 1989