

AT 급전방식 전철에서의 전자유도전압의 계산

°안진우·추영배·황영문

·경성대학교 ** 부산대학교

Calculation of the Inductive Voltage in AT Feeding Railway System

°Jin-Woo Ahn · Young-Bae Choo · Young-Moon Hwang

· Kyung-Sung University ** Pusan National University

1. 서론

경제발전과 더불어 보다 빠르고 편한 공공수송 수단에 대한 요구가 증대하면서 이의 유력한 해결방안으로 고속전철이 거론되고 있다. 이는 전철의 안정성, 신뢰성, 편리성, 쾌적성 및 환경보존성의 특징에서 기인하는 것이다.

그러나 고속전철은 10MW의 대용량을 사용하므로 운행구간 주위 통신 선로에 발생하는 유도장해는 상당한 수준으로 알려져 있으며 이러한 유도현상은 주위 환경에 따라 매우 복잡하게 나타나므로 이 값을 예측, 계산하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 교류 전기철도에 의한 통신선로의 유도 장해에 대한 명확한 해석과 예방 대책에 대해 심도있는 연구가 필요할 것이다.

본 논문은 현재 전기철도 운용에 널리 채택되고 있는 AT궤전 방식에 의해 통신 선로에 발생하는 전자 유도 현상에 의한 유도 전압을 예측 산정하는 식을 유도하고 수치해석코자 한다.

2. 교류전철에서의 전자유도현상

전기철도가 직류궤전 방식에서 상용 주파수 단상교류궤전 방식으로 변환함에 따라 근접하는 통신선에 유도장해를 일으키는 새로운 문제를 야기시켰다.

교류전철은 BT(Booster Transformer)방식과 AT(Auto Transformer)방식이 있다. BT방식은 전기철도의 약 20Km 구간마다 변전소를 설치하고, 그 사이에 약 1.5 - 4Km마다 흡상 변압기(BT)를 설치한 구간으로 나누어 궤전하는 방식으로, 트롤리와 이어의 단선 및 팬타 그래프의 파손등의 결점이 있다. 이에 비해 AT궤전방식은 BT방식의 결점을 보완하는 한편, 변전소를 BT 방식보다 2 - 4배 긴 구간을 궤전 할 수 있는 잇점이 있어 최근 널리 채택되고 있다. 그러나 통신선에 대한 유도장해의 측면에서 보면 AT방식이 BT방식보다 유도 현상이 복잡하며 특히 시의 통신선 및 장거리에 걸친 시내통신에 대하여는 예측 계산이 매우 어렵다고 알려져 있다. 특히 전차선 위치에 대한 레일의 누설전류 분포에 대한 해석은 전 궤전구간에 대한 임피던

스 매트릭스에 의해 예측 대상 선로마다 유도전압이 최대가 되는 부하 위치를 검토해야 한다.

2.1 AT궤전 회로의 전류분포

AT 궤전방식은 단권 변압기를 설치하여 변압기의 한 단을 트롤리(T)에, 다른 단을 정궤전선(positive feeder, PF)에, 그 중성점은 레일(R)에 접속하여, 트롤리와 PF간에 전차전압의 2배의 전압을 가하여 운전한다.

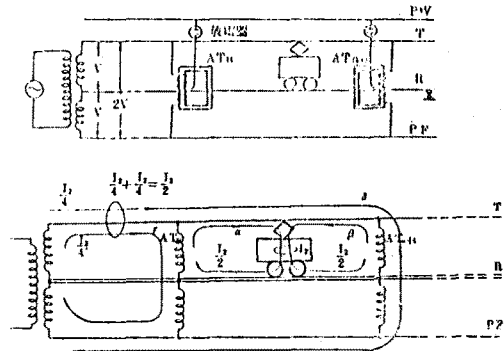


그림 1. AT 궤전방식의 회로도 및 전류분포

Fig. 1. Circuit diagram and current of AT feeding system

AT 궤전방식은 일정 간격마다 AT를 설치하므로, 전차들 사이에 두고 좌우에 존재하는 AT에서 전류가 공급된다. 만약 그림 1과 같이 AT₁과 AT₂에서만 전류가 공급된다고 가정할 때, 통신선에 대한 유도작용을 살펴보면

변전소와 AT₁구간에서는 트롤리 전류는 $I_1/2$, 레일 전류는 0 및 PF전류는 $I_1/2$ 이므로 통신선에 영향을 미치는 유도전류는 0이다. AT₁과 전차구간에서의 전류는 α , β 경도의 전류이다. 이 중 β 는 트롤리와 PF전선을 통하는 loop전류이므로 직접 관계가 없다. 따라

서 α 경도의 전류만이 유도작용을 하고 그 크기는 $I_0/2$ 이다. 전차와 AT₀₀구간에 흐르는 전류는 β 와 δ 의 경도이나, δ 경도는 유도에 관계없다. 그리하여 유도에 관계하는 것은 β 경도의 전류로, 그 크기는 $I_0/2$ 이다. AT₀₀의 우측구간에서는 전류가 0 이므로 유도는 생기지 않는다.

그러나 일반적으로 궤전선간의 임피던스는 무시할 수 없으므로, 전차가 AT위치 부근에 있을 때는, AT의 부담이 커진다. 그리하여 전차의 최대 부하에 가까운 출력이 요구된다. 그러므로 AT의 용량이 커지게 되므로 AT에 적당한 내부 임피던스를 갖게 하여 양측 2개의 AT뿐 만 아니고, 약 10km마다 설치된 주위의 AT에 부하를 분담시키는 방법이 채택되고 있다. 그 결과 전차 부하에 비하여 작은 용량의 AT를 사용할 수 있으나, AT의 내부 임피던스의 유한성 때문에 유도에 기여하는 전류는 전차 양단의 AT뿐만 아니고 근처의 모든 AT에서 전류가 흘러 들어가 유도현상을 예측, 산정하기가 매우 어렵게 된다. 그리고 부하의 위치에 따라 전류의 분포도 변화하므로, 어느 위치에서 유도 전압이 최대가 될 것인지를 간단히 결정할 수 없게 된다.

2.2 Ampere-km 개념의 도입

전차선에 인정한 통신선에서의 유도는 레일전류와 누설전류 분포 등에 따라 변화하므로 통신선에 유도를 일으키는 전류를 일률적으로 정하는 것은 불가능하다. 주 지수함수로 표시되는 레일전류의 효과는 위치에 따라 다르므로, 레일의 대지귀로전류의 분포를 소구간으로 나누어, 그것의 Ampere-km의 평균치로 산정함이 편리할 것이다. 즉 소구간의 길이가 그 구간의 평균적 대지귀로전류의 곱으로 표시하는 방법으로 이 소구간이 세분될수록 정확한 값을 얻을 수 있을 것이다.

2.3 유도전압 예측 산정식

1) 상시 유도 전압식

유도를 일으키는 전류인 대지귀로전류는 $D=I_0 - I_1$ 의 소구간에서

$$(1-n_0)I_0 \cdot k_0 \cdot D = \text{Amp} \cdot \text{km} \quad (1)$$

이므로, 이 소구간에서의 유도 전압은

$$V = \frac{\text{Amp} \cdot \text{km}}{D} \cdot \omega \cdot M \cdot I_0 \cdot K_0 \times 10^{-9} [\text{V}] \quad (2)$$

이다. 여기서 K_0 는 차폐계수이다.

실제 예측 계산에서는 1[A]당으로 정의 되므로, 상시 유도 전압 V_s 는

$$V_s = A_s \cdot M_s \cdot I_0 \cdot K_0 \times 10^{-9} [\text{V}] \quad (3)$$

$$A_s = \omega_s \cdot \frac{[\text{Amp} \cdot \text{km}]}{D} \cdot I_0 \cdot K_0 \times 10^{-9} [\text{V}/\mu\text{H}] \quad (4)$$

이며, 여기서

A_s : 부하전류에 의한 기본주파수에 대한 기유도치 $[\text{V}/\mu\text{H}]$

M_s : 기본주파수에 대한 전차선과 통신선과의 상호인덕턴스 $[\mu\text{H}/\text{km}]$

I_0 : 전차선과 통신선과의 평균길이 $[\text{km}]$

K_0 : 기본주파수에 대한 통신선의 차폐계수, $K_1 \times K_3$

ω_s : 기본주파수에 대한 각 주파수 $[\text{rad}/\text{s}]$

이다.

(2) 유도잡음전압식

상시 유도전압과 같이 $\text{Amp} \cdot \text{km} \{I[A]\}$ 를 계산하여, V_s 을 구하면

$$V_s = A_s \cdot I_0 \cdot K_0 \quad [\text{mV}] \quad (5)$$

$$A_s = \omega_s \cdot \frac{[\text{Amp} \cdot \text{km}] \cdot I_0}{P} \cdot \frac{J_s \cdot K_s \cdot K_0}{100} \times 10^{-9} [\text{V}/\mu\text{H}] \quad (6)$$

여기서

A_s : 부하전류에 의한 800Hz에서의 기유도치 $[\text{mV}/\mu\text{H}]$

M_s : 800Hz에서의 전차선과 통신선의 상호 인덕턴스 $[\mu\text{H}/\text{km}]$

I_0 : 전차선과 통신선과의 평행장 $[\text{km}]$

K_0 : $K_1 \cdot K_3$

λ : 통신선과의 평행도

J_s : 부하전류 100A당 등가방해전류

ω_s : 800Hz에 해당되는 각 주파수 $[\text{rad}/\text{s}]$

이다.

(3) 이상시 유도 위험전압식

AT는 지막전류와 같은 대전류가 흘러도 침침의 포화가 없다. 그러므로 전류치만 다르고 그 식은 상시유도전압식과 같다.

$$V_s = A_s \cdot M_s \cdot I_0 \cdot K_0 \times 10^{-9} [\text{V}] \quad (7)$$

$$A_s = \omega_s \cdot \frac{[\text{Amp} \cdot \text{km}]}{D} \cdot I_0 \cdot K_0 \times 10^{-9} [\text{V}/\mu\text{H}] \quad (8)$$

여기서 I_0 : 전차선의 지막고장전류[A]이다.

(4) 부하조건 및 유도전압의 합성

부하조건은 상행선 및 하행선 12km내에 전철이 모두 있을 때를 같은 구간에 있는 것으로 한다. 유도전압의 합성은 상하행선 따로 계산하여 합성한다. 즉

$$\text{합성유도 전압} = \sqrt{V_{s1}^2 + V_{s21}^2 + V_{s1}^2 + V_{s22}^2} \quad (9)$$

V_{s1} : 상행선의 최대잡음유도전압

V_{s21} : V_{s1} 을 발생하는 부하위치에서 전후 12km 떨어진 부하 위치에서의 유도잡음전압의 절대값 중 큰 값

V_{s1} : 하행선의 최대 잡음 유도전압

V_{s22} : V_{s1} 을 발생하는 부하위치에서 전후 12km 떨어진 부하 위치에서의 유도잡음전압의 절대값 중 큰 값

이다. 또한 상시 유도전압의 합성은 상하행선이 같은 구간내에 있을 경우 상행선의 값과 하행선의 값의 그 절댓치합이며 부호는 절댓치가 큰 것을 따른다.

3. 유도전압의 산정

3.1. 회로망의 구성

AT궤전방식은 50~80km마다 변전소(SS)를 설치하고, 한 번

전소에서 3~4개의 AT간격 사이를 균전하도록 하여 전자유도 전압을 경감하도록 한다. 그러므로 운전구간의 양쪽 AT에서 레일의 전류를 정 복전선으로 흡수하여, 운전 구간이외에는 전류가 흐르지 않아 유도장해가 일어나지 않도록 하는 것이다. 그러나 이 경우 AT자기용량이 과중할 수 있어 인접 AT가 그 일부를 담당하게 할 필요가 있다. 즉, 각 AT의 내부누설임피던스를 적당히 갖도록 하면 되나 이 경우 부하전류의 분포가 매우 복잡하여 유도전압의 예측 및 산정이 어렵게 된다.

그러므로 본 해석에서는

- 1) 유도전압의 예측산정을 위해 본 연구에서는 4개의 AT를 설치한다.
- 2) 전철회로망은 임피던스 매트릭스로 구성된다.
- 3) 그림 2는 A구간에서 전차가 운전할때의 회로망을 나타내고 있고, Amp.km를 산정하기 위해서는 각 분기의 전류를 산정해야 하고, 각각의 AT전압도 여자전류에 따라 다르므로, 이 값도 미지수로 두고 해석해야 한다.
- 4) 전차의 운전상태에서 등가 역기전력 및 임피던스는 미지수로 되어있고, 다만 운전시의 전차전류만이 기본 기지정수이므로 복소수 산정에 특별한 조건 설정이 필요하다. 또한 변전소의 권선전압과의 위상차의 설정이 중요한 사항으로 대두되므로, 이를 반복계산 하였다.

3.2 회로방정식의 구성

그림 2는 전차가 AT1과 AT2 사이에 위치할 때의 등가회로망을 나타내고 있다. 전차가 각 구간에 있을 때 전압 및 전류 방정식을 세우고 이 방정식에서 Amp.km를 구할 수 있다. 그러므로 각 부하위치 마다 전 통신선 구간에 대한 각종유도전압을 구하고, 또 각 통신선에 유도되는 전압을 구하여 최대유도전압을 일으키는 부하의 위치와 그 때의 전압을 구한다.

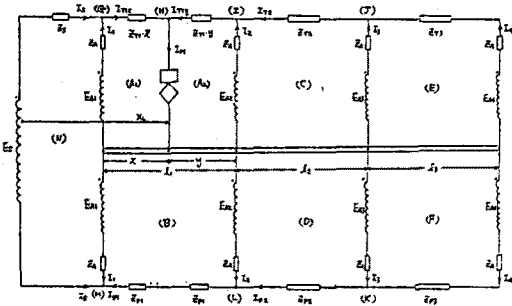


그림 2 부하구간 A에서의 등가 회로망
Fig. 2 Equivalent network at train location A

3.3 Amp-km의 산정

Amp-km는 전차부하의 각 위치에 대하여 산정되며, 세분된 각 통신구간에 대하여 산정한다. 통신구간은 AT구간, 통신선의 직선구간, 통신선의 종별구간, 터널의유무, 타레일의 유무에따라 세분된다.

X_0 을 구간별 기점에서 부하 위치까지의 거리, $L_n(i)$ 를 기점에서 통신선 위치까지의 거리라 할때 방정식은 다음과 같다.

$$I(L_n(i)) = \frac{1}{L_n(i+1) - L_n(i)} \int_{L_n(i)}^{L_n(i+1)} I(L_n(i)) dL_n(i) \quad (10)$$

3.4 유도전압의 산정

전차가 구간 A에 있을때 인접통신선에 유도되는 상시 기유도전압은 그림 3과 같다.

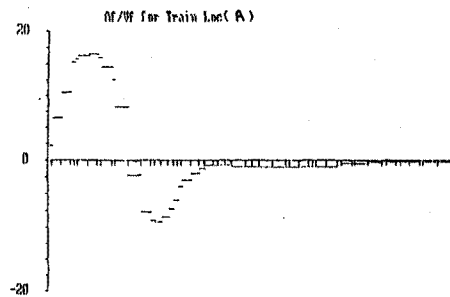


그림 3 구간 A에서의 유도전압
Fig. 3 Induced voltage at train location A

4. 결론

대 용량의전력을 사용하는 전철선에 인접한 통신 선로에 발생하는 유도장해는 복잡하여 이 값을 예측, 계산하는 것은 매우 어렵다. 본 논문은 현재 전기철도 운용에 널리 채택되고 있는 AT궤전 방식에서 통신 선로에 발생하는 전자 유도 전압을 예측 산정하는 식을 유도하고 이를 선로에 적용하여 유도전압을 계산하였다.

참고 문헌

- 1) 誘導, 日本電氣通信協會 昭和45
- 2) CCITT, Directives Vol. IV Geneva 1989