

시간 변수를 고려한 전차선로 허용전류 계산 기법 연구

김주락* 권삼영 이기원 창상훈
한국철도기술연구원

A Study on Calculation of Permissible Current Capacity on Catenary System

Joorak Kim Sam-Young Kwon Kiwon Lee Sang-Hoon Chang
Korea Railroad Research Institute

Abstract - This paper presents an advanced calculation method of permissible current capacity on catenary system. If the permissible current calculation method used in electric power system is applied to electric railroad system, it is troublesome. Because electric load in catenary system varies periodically according to time. Therefore, this study proposes permissible current calculation method through heat equation according to time variation.

1. 서 론

전기철도차량에 공급되는 전기에너지는 전차선, 조가선, 급전선, 보호선 등으로 구성된 전차선로를 통해 전기차량에 전달된다. 이 중 전차선은 차량에 직접적으로 전류를 공급하기 위한 용도로 사용되며, 조가선의 경우 전차선을 지지하고 일부의 전류를 통전시킨다. 또한 급전선은 차량에 공급된 전류를 변전소로 귀로 시키기 위하여 사용되는 전선이다. 이렇게 전류를 통전시키는 전선들은 자체 내부저항에 의해 열에너지를 발산하게 되며, 이로 인한 온도 상승으로 전선이 연화되어 강도가 저하될 수 있다. 따라서 전차선로에 흐르는 전류 크기에 따라 적절한 전차선을 선택하는 것은 안전하고 신뢰성 있는 철도운영에 기여할 것이다.

전차선로 설계시 수행하는 전차선로의 허용전류용량 계산은 전력계통에서 사용하는 일반 나전선에서의 계산 방법을 이용하여 왔다. 그러나 전기철도시스템의 경우 일반 전력계통과는 달리 부하가 이동하기 때문에, 시간에 따라 부하량의 변화가 열차 운행스케줄에 따라 주기적으로 일어난다는 점에서 큰 차이가 있다. 따라서 일반 전력계통에서의 전류 용량 검토와는 달리 시간을 고려한 전선의 열평형 방정식을 수식화 해야 할 것이다.

본 논문에서는 연속전류 개념에 기초하여 시간 경과에 따른 전차선의 온도 상승을 구하는 방법을 제안한다. 이 방법은 전류에 의한 줄열 및 태양 일사에 의한 온도 상승과 전선의 복사 및 대류에 의한 열 방산에 기초한 열평형 방정식으로서 미소시간에 따라 변화하는 온도량을 미분 방정식으로 구성하였으며, 수치해석적인 방법을 통해 방정식의 해를 구하였다. 제안한 방법의 효용성을 입증하기 위해 호남선 전철화 기본 계획에서 검토한 전차선 Cu 110mm², 조가선 Bz 65mm², 급전선 ACSR 288mm²에 대한 사례계산을 수행하였다.

2. 기존 전차선로 허용전류 계산 기법 고찰

전선의 허용전류는 전류에 의한 전선의 온도 상승에 따라 결정된다. 전선에서 발생하는 열은 전류의 통전에 따라 상승되며, 주위 공기에 의한 대류와 전선에서 발산하는 복사열 등에 의해 방출된다. 따라서 전선의 온도 상승은 전류에 의한 발열과 대류 및 복사에 의한 방출열의 차에 의해 계산된다. 이는 식 (1)과 같다.

$$I = \sqrt{\frac{\pi d k \Delta T}{R}} \quad (1)$$

여기서, d : 전선 지름 [cm]
k : 열방사 계수 [W/cm² °C]
ΔT : 온도 변화량 [°C]
R : 최종 온도에서의 전선 저항

식 (1)에서 k는 열방사 계수로서 도체 주위에서 발생하는 대류와 복사에 의한 열 방사를 나타내는 계수로서, 도체 주위에 바람이 있을 때와 없을 때에 따라서 계수 값이 달리 계산된다. 먼저, 바람이 있을 때의 계산식은 다음 식 (2)와 같다.

$$k_w = h_r \eta + h_w \quad (2)$$

단, k_w : 바람이 있을 때의 열방사 계수
h_r : 복사에 의한 열방사 계수
η : 도체 표면에서의 열방사율
h_w : 바람이 있을 때의 대류에 의한 열방사계수

$$h_r = 0.000576 \frac{\left(\frac{273+T}{100}\right)^4 - \left(\frac{273+T_a}{100}\right)^4}{T - T_a} \quad (3)$$

단, T : 도체 온도 [°C]
T_a : 주위 대기 온도 [°C]

$$h_w = \frac{0.00572}{\left(273+T + \frac{T-T_a}{2}\right)^{0.123}} \sqrt{\frac{v}{d}} \quad (4)$$

단, v : 풍속 [m/s]
d : 전선의 지름 [cm]

또한, 바람이 없을 때 도체의 열방사 계수는 다음과 같다.

$$k_c = h_r \eta + h_c \quad (5)$$

단, k_c : 바람이 없을 때의 열방사 계수
h_c : 바람이 없을 때의 대류에 의한 열방사 계수

$$h_c = 0.00035 \sqrt[4]{\frac{T - T_a}{d}} \quad (6)$$

식(1)은 Luke의 실험식을 적용한 것으로서, 나전선의 허용전류와 온도상승 사이에는 가선 후 부하전류에 의한 발열량과 전선에서 주위로 향하는 대류에 의하여 발산되는 열량과 같다는 것을 기초로 정식화된 수식이다. 그러나 식 (1)은 통전시간과는 관련이 없는 수식으로서, 시간 변수를 포함하고 있지 않은 함수이다. 따라서 철도차량의 이동에 따라 전차선로 각 지점에서 부하전류의 양이 증가와 감소를 반복하는 형태로 나타나는

전기철도시스템에서는 식 (1)과 같은 기존의 방식으로는 부하전류의 증감을 표현할 수 없어 시간에 따른 전차선로의 온도변화를 유도할 방법이 필요하다.

3. 시간을 고려한 전차선로 허용전류 계산

전차선로에서 사용되는 전선의 허용전류를 계산하는 기법으로 일반적인 전력계통과 같이 취급하여 일반 전선의 연속 허용전류를 계산하는 수식에 따라 계산하는 경우가 있다. 그러나 철도 선로에는 최대 운전시격이 지정되어 있으므로 일전 급전구간 내에 일정 편성이상의 열차가 운행될 수 없다. 또한 열차 부하는 시간에 따라 이동하는 부하이므로 전차선로의 각 선로 지점에서 보았을 때 간헐부하 특성을 가짐을 알 수 있다.

이와 같이 일반 전력계통의 부하전류와는 다른 특성을 보이는 철도시스템에서의 전차선로 허용전류 계산은 부하전류의 시간적 변화 형태를 분석하여 이에 대응하는 수치계산의 형태로 행하여야 할 것이다. 이에 본 논문에서는 간헐 부하형태의 부하전류를 고려한 계산기법으로의 확장을 위해 시간 변화에 따른 온도 상승을 나타내는 미분 방정식 형태로 열평형 방정식을 유도하였다.

3.1 도체에서의 열평형

주위 온도 T_a 인 공기층 중에 있는 길이 L , 초기 온도 T_0 인 원통형 도체에 전류 I 가 흐르게 되면, 도체의 온도가 T 에서 T_L 로 상승하게 된다. 전류가 흐르는 dt 시간 동안에 도체 온도가 dT 만큼 상승한다고 하면 dt 시간 동안의 주열에 의하여 받는 에너지 E_s 와 태양열로부터 받는 에너지 E_a 의 합은 도체의 온도를 dT 만큼 상승시키는 데 소비되는 에너지 E_c 와 대류에 의하여 발산되는 에너지 E_c 와 복사에 의하여 발산되는 에너지 E_r 의 합과 같다고 할 수 있다. 즉, 이를 수식으로 표현하면 다음 식과 같다.

$$E_j + E_s = E_a + E_c + E_r \quad (7)$$

3.1.1 전류에 의한 주열에너지

E_j 는 도체에 전류를 통전시킴으로써 발생하는 열에너지이며, 시간의 함수로서 다음 식으로 구할 수 있다.

$$E_j = \rho_{20} [1 + \alpha(T - 20)] \frac{L}{A} I^2 dt \quad (8)$$

여기서, ρ_{20} : 20°C에서의 도체의 저항률 [$\Omega \cdot m$]

α : 저항의 온도계수

T : 도체의 온도 [°C]

A : 도체의 단면적 [m^2]

L : 도체의 길이 [m]

I : 전류 [A]

3.1.2 태양열 흡수에너지

직사광선에 노출된 케이블이 흡수하는 태양열 에너지로서 국제규격인 IEC 287-2-1의 식을 사용하기로 한다. 식 (9)는 다음과 같이 시간의 함수로 표현된다.

$$E_s = Ld\eta H \cdot dt \quad (9)$$

여기서, d : 케이블 직경 [m]

η : 도체 표면에서의 열 방사율(흑체계수)

H : 일사량

3.1.3 도체 온도상승에 소비되는 에너지

이 에너지는 시간과는 관계없고 재료의 성질과 온도상승량에만 관계되며 다음과 같다.

$$E_a = ALsc \cdot dT \quad (10)$$

여기서, s : 도체의 비중 [kg/m^3]

c : 도체의 비열 [$J/kg \cdot ^\circ C$]

3.1.4 대류에 의한 방사에너지

이 에너지는 주위 공기층으로의 대류에 의한 열발산에 의한 것이다. 식 (11)은 시간의 함수로서 도체와 주위 공기와의 온도차에 비례하는 함수로서 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때, 열발산계수 h 는 2장에서와 같이 바람의 유·무에 따라 다르게 적용된다. 즉, 바람이 있을 때에는 식 (4)의 h_w 가, 바람이 없을 때에는 식 (6)의 h_c 가 각각 적용된다.

$$E_c = ULh(T - T_a)dt \quad (11)$$

여기서, U : 도체의 둘레길이 [m]

h : 열 발산 계수 [$W/m^2 \cdot ^\circ C$]

T_a : 주위 공기의 온도 [°C]

3.1.5 복사에 의한 발산 에너지

어떤 물체에서 복사에 의해 발생하는 열에너지는 스테판·볼츠만 법칙으로 표현이 가능하며, 식 (12)와 같다. 이때, 볼츠만 상수는 5.67×10^{-8} 으로 한다.

$$E_r = UL\eta\sigma[(T + 273)^4 - (T_a + 273)^4]dt \quad (12)$$

여기서, σ : 볼츠만 상수 [$W/m^2 \cdot K^4$]

3.2 도체의 열평형 방정식 및 해법

위의 식 (7)에 식 (8)~(12)을 대입하여, dT/dt 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다. 따라서 전차선로의 각 전선들의 데이터를 입력하여 식 (13)을 수치해석적인 방법으로 풀면 각 전선들의 허용전류 용량을 구할 수 있다. 그림 1은 계산 순서도를 나타낸 것이다.

$$\frac{dT}{dt} = \frac{1}{A^2 sc} [I^2 \rho_{20} (1 + \alpha(T - 20)) \beta_a + Ad\eta H - AUh_c(T - T_a) - AU\eta\sigma\{(T + 273)^4 - (T_a + 273)^4\}] \quad (13)$$

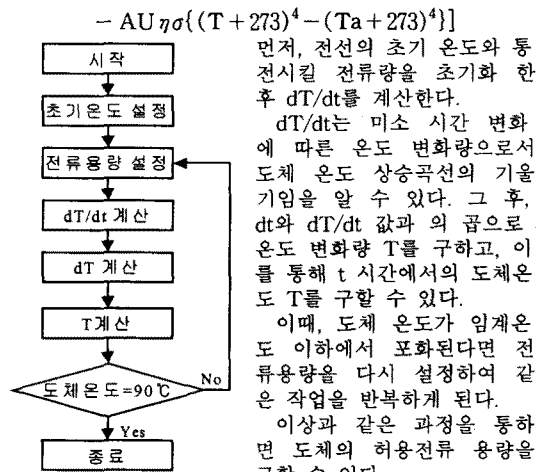


그림 1. 계산순서도

4. 사례연구

4.1 입력자료

제한한 허용전류 계산 기법의 검증을 위해 현재 경부 고속철도 구간과 호남선 전철화 기본 계획 단계에서 검토되었던 전차선로 설비들을 대상으로 사례 계산을 수행하였다. 계산 대상은 전차선의 경우 Cu 재질의 110mm², 조가선은 Bz65.49mm², 그리고 급전선의 경우는 ACSR 288mm²이며, 각 전선별로 시간 경과에 따른 전선의 온도 상승을 그래프로 나타내었다. 각 전선의 특성 및 재원은 표 1.과 같다. 이때 주위의 대기온도는 최악의 상황인 4

0℃로 상정하였으며, 임계 온도의 경우 전선들의 기계적 강도가 저하되지 않는 90℃로 설정하였다.

표 1. 전선 도체들의 제원

전선 계수	전차선	조가선	급전선	단위
단면적	1.11E-4	6.55E-5	2.88E-4	m ²
비중	8,950	8,500	2,700	kg/m ³
비열	386	353	878	J/kg·℃
저항률	1.774E-8	2.8E-8	2.8E-8	Ω·m
저항의 온도계수	0.00385	0.00383	0.004	
직경	0.01234	0.0105	0.02205	m
혹제계수	0.5	0.8	0.8	
일사량	0.1	0.1	0.1	W/cm ²
둘레 길이	0.0401	0.0329	0.09854	m
주위온도	40	左同	左同	℃
볼츠만 상수	5.67E-8	左同	左同	W/m ² ·°K ⁴
풍속	0.5	左同	左同	m/s

4.2 계산 결과

그림 1과 같은 방법으로 각 전선의 허용전류 용량을 계산한 결과는 표 2와 같다. 이 때의 전류용량은 앞서도 언급했듯이 도체의 기계적 강도가 저하되지 않는 임계온도인 90℃를 기준으로 계산된 것이다. 또한, 시간에 따른 각 전선의 온도상승을 나타낸 것이 그림 1~3이다. 그림에서 알 수 있듯이 각 도체에 전류가 흐르면 일정 시간동안 도체의 온도가 상승하며, 시간이 경과하면 도체 온도 상승은 더 이상 일어나지 않고 포화됨을 알 수 있다. 또한 그림 4는 풍속에 따른 허용전류 용량의 차이를 나타낸 것으로서 전차선로의 온도는 바람이 있을 때와 없을 때에 따라 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 그러나 전차선이 레일에서 5~6m의 위치에 있으므로 바람이 없는 날에도 지표로부터 상승기류가 항상 있다고 볼 수 있기 때문에, 표 2의 결과는 풍속 0.5%의 환경하에서 계산한 것이다.

표 2. 각 전선의 허용전류 용량 결과

전선종류	연속허용전류
전차선 신품	460 A
전차선 25% 마모후	360 A
급전선	740 A
조가선	290 A

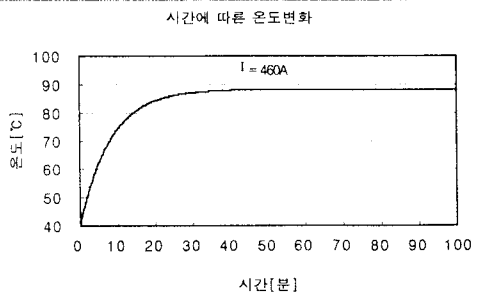


그림 2. 전차선 온도상승곡선

5. 결 론

본 논문은 전차선로에 통전 가능한 최대 전류용량을

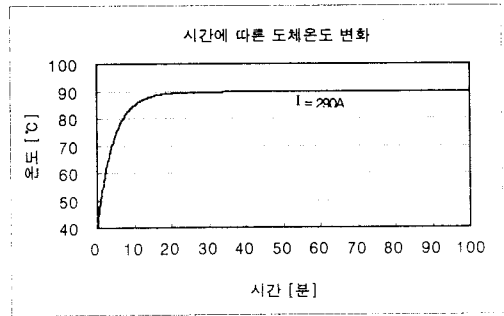


그림 3. 조가선 온도 상승곡선

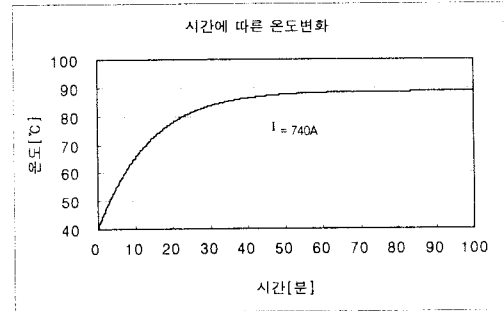


그림 4. 급전선의 온도상승곡선

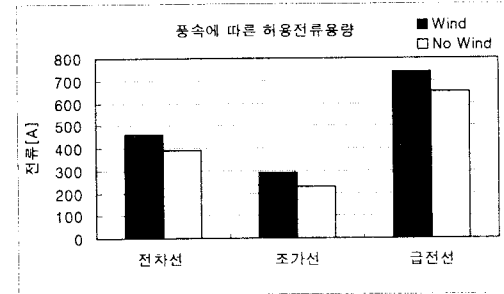


그림 5. 풍속 유무에 따른 전차선로 전류용량 비교

계산하는 방법을 새롭게 제안한 연구로서 결론을 요약하면 다음과 같다.

- 임계 온도에서 수계산에 의한 기존 방법은 열차의 이동에 따른 부하 변화를 고려하는 것이 불가능하다.
 - 제안한 계산법은 미소 시간의 변화에 따른 도체의 온도 변화량을 계산함으로써 일정 시간동안의 도체 온도 상승 정보를 얻을 수 있다.
 - 제안한 방법을 통해 전차선, 조가선, 급전선의 실제 데이터를 기초로 허용전류를 산출하였다.
- 본 논문에서는 가선에 흐르는 전류용량을 고정시켜 도체의 온도 상승 변화를 살펴보았지만, 앞으로 열차 이동에 따른 부하전류를 정식화하여 적용한다면 적절한 허용전류 계산기법을 마련할 수 있을 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국철도기술연구원, 고속 전차선로 설계계산기준서 개발 및 동적시험기술연구, 한국고속철도공단, pp. 53~118, 1999. 12
- [2] (주)유신코퍼레이션, 경부선 천안~조치원간 전철, 전력설비 실시설계보고서, 철도건설본부, 1999.6
- [3] 김양수, 유해철, 전기철도공학, 동일출판사, 1999.