

고속철도 교류 급전계통 주변의 정전유도 영향 분석

명성훈*, 이재복*, 김용식**, 민석원***, 이종우****, 이장우****
 *한국전기연구소, **호서대학교, ***순천향대학교, ****한국철도기술연구원

Analysis on Electrostatic Coupling around High speed Railway Feed System

S. H. Myung*, J. B. Lee*, E. S. Kim**, S. W. Min***, J. W. Lee****, J. M. Lee****
 KERI*, Ho Seo Univ**, SunchunHang Univ***, KRRI****

Abstract - In this paper, a numerical calculation method based on CSM has been described. The electric field must be nonuniform even close to railway feed system. In that case, to calculate induced voltage, this paper uses the mutual capacitances between a conductor and railway feed system. The induced voltages of a conductor located at point (height=4m, distance=8m) near by railway feed system are calculated from 370V to 668V.

예를 들어 m개의 도체 전압(대지에 대한 전위)을 V_1, V_2, \dots, V_m 라고 하고 각 도체가 갖고 있는 전하를 Q_1, Q_2, \dots, Q_m 이라 하면 Q_i 와 V_i 는 도체의 형상과 배치에 의해 결정되는 계수를 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} Q_1 &= C_{10} V_1 + C_{10}(V_1 - V_2) + \dots + C_{1m}(V_1 - V_m) \\ Q_2 &= C_{20} V_2 + C_2(V_2 - V_1) + \dots + C_{2m}(V_2 - V_m) \\ &\dots \dots \dots \\ Q_m &= C_{m0} V_m + C_{m1}(V_m - V_1) + \dots + C_{m,m-1}(V_m - V_{m-1}) \end{aligned} \quad (1)$$

1. 서 론

고속전철 급전선에 의한 정전유도전압을 계산하기 위해서는 정전용량 계산이 선행되어야 한다. 간단한 전극계의 정전용량은 해석식으로 주어지지만 전체 분포가 수치계산으로 밖에 구해지지 않는 배치에서는 정전용량값도 수치적으로 계산하여야 한다. 본 연구에서는 전하중첩법을 사용하여 정전용량을 구하였으며, 다음으로 고속철도 급전선 주변의 절연된 도체에 유기되는 유도전압은 절연된 도체상의 전 전하 합이 영이 되는 것과 도체 표면의 모든 지점의 전위는 미지의 유도전압 V_f 가 되는 것을 이용하여 구하게 된다. 본 연구에서 급전선로와 피유도선로간의 정전 용량을 계산하여 피유도선의 위치 변화에 따른 유도전압을 계산한 결과, 피유도선의 높이가 4m이고 최외각 피더로부터 8m정도 이격된 지점에서 열차가 없는 경우에는 정전유도전압이 370V, 열차가 있는 경우에는 490V에서 668V까지 나타남을 알 수 있었다. 그러나 신호제어 및 통신선의 일부 구간만이 전력선과 평행하게 시설된 경우 신호제어 및 통신선이 전력선 노출구간과의 비 만큼 유도전압은 경감하게 된다.

여기에서 C_{i0} 는 도체 i의 자기 정전용량값 또는 대지 정전용량값이되고 C_{ij} 는 도체 i와 j간의 상호 정전 용량값이며 식(1)은 다음과 같이 나타내는 것이 가능하다.

$$\begin{aligned} Q_1 &= D_{11} V_1 + D_{12} V_2 + \dots + D_{1m} V_m \\ Q_2 &= D_{21} V_1 + D_{22} V_2 + \dots + D_{2m} V_m \\ &\dots \dots \dots \\ Q_m &= D_{m1} V_m + D_{m2} V_2 + \dots + D_{mm} V_m \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 일반적으로 D_{ij} 는 용량계수, $D_{ij} (i \neq j)$ 는 정전유도 계수로 i 이외의 도체를 모두 접지하고 도체 i의 전위를 1[V]로 한 경우 도체 i 또는 j에 나타나는 전하량이다. 식(1)과 식(2)식을 비교하면 다음과 같은 식이 성립함을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} C_{10} &= D_{11} + D_{12} + \dots + D_{1m} \\ C_{ij} &= -D_{ij} \quad (i \neq j, j \neq 0) \end{aligned} \quad (3)$$

즉 D_{ii}, D_{ij} 를 알면 바로 용량이 구해진다. 또한 일반적으로 $D_{ij} = D_{ji}$ 의 관계가 있으므로

$$C_{ij} = C_{ji} \quad (i \neq j \neq 0) \quad (4)$$

2. 정전용량 계산

그림1은 다도체계에 있어서의 정전용량을 나타내는 간단한 개념도이다. C_{i0} 는 대지간 정전용량이고 C_{ij} 는 도체 상호간 정전용량이다.

이 되어 상호 정전용량 및 대지 정전용량은 양의 값이 된다. 정전용량 계산은 경계 요소법의 방정식이 전압과 전하의 관계식으로 표현되어 식(2)와 유사하여 구하기가 영역 분할법보다 적합하다. 따라서 전하 중첩법을 이용하여 정전용량을 계산하는 과정을 설명하면 다음과 같다. 전하 중첩법의 방정식은 다음과 같이 된다.

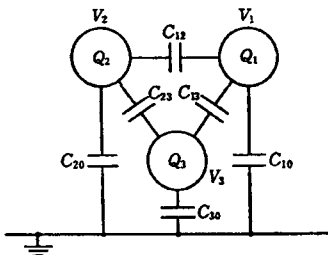


그림 1. 다도체의 정전용량

$$\begin{pmatrix} P_{11} & P_{12} & \dots & P_{1n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & P_{nn} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ \dots \\ q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} v_1 \\ \dots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (5)$$

식(5)에서 도체 1의 전압 $v_1 = 1[V]$, 다른 모든 도체 전압을 0으로 하고 전체 계산을 하여 가상 전하량을 구한다. 각 도체 내의 가상 전하의 수를 m_1, m_2, \dots, m_n 이라 하면

$$Q_1 = \sum_{j=0}^{m_1} q(j), \quad Q_2 = \sum_{j=m_1+1}^{m_1+m_2} q(j), \dots, \dots, \\ Q_m = \sum_{j=n-m_n}^n q(j) \quad (6)$$

이 경우 식(2)로부터 알 수 있듯이

$$D_{11} = Q_1, D_{12} = D_{21} = Q_2, \dots, \dots, D_{1m} = D_{m1} = Q_m \quad (7)$$

이것으로부터 식(3)에 의해 다음과 같이 정전용량을 계산할 수 있다.

$$C_{10} = \sum_{j=1}^m Q_j \\ C_{ij} = -Q_i \quad (8)$$

그림 2는 전차선과 피유도선과의 정전유도 결합 메카니즘을 나타낸 것이고, 그림 3은 본 연구에서 해석에 사용된 고속전철의 급전 계통도와 급전선의 우측에 4가지 위치에서 각각 피유도선이 지나갈 경우를 나타낸 그림이다.

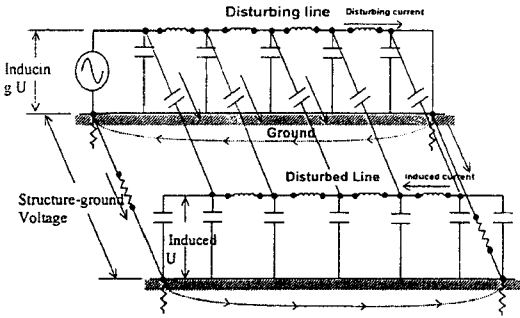


그림 2. 전차선과 피유도선과의 정전유도 결합 메카니즘

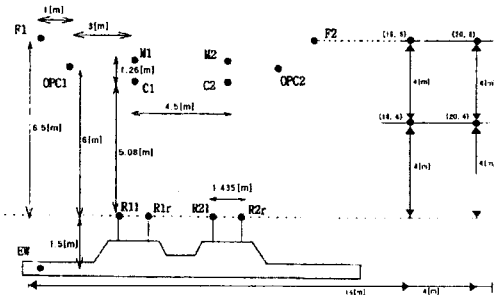


그림 3. 급전 계통도 및 피유도선

각 전선의 위치에서 전선과 급전계통의 각 선들과의 상호 정전용량과 대지간 정전용량을 구하였다. 대지와 전선에 $1[V]$ 를 인가하고 그 외의 급전도체의 전위를 $0[V]$ 로 하여 구한 급전선로와 우측 전선간의 정전 용량값은

표1 및 표2와 같다. 여기서 표1은 선로에 열차가 없을 경우이고, 표2는 좌측 선로에 열차가 지나갈 경우에 각 급전선 및 열차와 우측 전선과의 정전용량을 나타낸 것이다. 이를 이용하여 전선의 위치 변화에 따른 유도전압을 계산하였다.

표 1. 열차가 없을 경우 선로와 피유도선과의 정전용량 (pF/m)

정전용량 \ 위치	(16.4)	(16.8)	(20.4)	(20.8)
Cm1.f	0.0772	0.1414	0.0601	0.1080
Cm2.f	0.2012	0.3266	0.1286	0.2127
Cc1.f	0.0643	0.1039	0.0444	0.0761
Cc2.f	0.2184	0.2751	0.1143	0.1690
Cf1.f	0.0508	0.1028	0.0466	0.0880
Cf2.f	0.7124	1.2862	0.4258	0.6595
Copc1.f	0.0426	0.0825	0.0367	0.0681
Copc2.f	0.4811	0.7011	0.2590	0.3830
Cr1.f	0.0231	0.0314	0.0139	0.0223
Cr1r.f	0.0381	0.0436	0.0195	0.0286
Cr2.f	0.1068	0.0934	0.0448	0.0562
Cr2r.f	0.2389	0.1733	0.09067	0.10266
Co.f	6.2594	4.6645	7.1002	5.7195

표 2. 좌측에 열차가 존재시 선로와 피유도선과의 정전용량(pF/m)

정전용량 \ 위치	(16.4)	(16.8)	(20.4)	(20.8)
Cm1.f	0.0591	0.1156	0.0489	0.0898
Cm2.f	0.1907	0.3126	0.1226	0.2031
Cc1.f	0.0281	0.0517	0.0218	0.0392
Cc2.f	0.2035	0.2557	0.1058	0.1559
Cf1.f	0.0419	0.0895	0.0408	0.0783
Cf2.f	0.7086	1.2814	0.4236	0.6561
Copc1.f	0.0308	0.0649	0.0290	0.0553
Copc2.f	0.4766	0.6952	0.2564	0.3789
Cr1.f	0.0004	0.0008	0.0003	0.0007
Cr2.f	0.0033	0.0030	0.0014	0.0017
Cr3.f	0.090	0.0733	0.0359	0.0429
Cr4.f	0.2308	0.1632	0.0862	0.0959
Ctrain	0.2600	0.3467	0.1518	0.2405
Co.f	5.6177	3.7806	6.7145	5.1000

3. 정전유도전압 계산

절연된 도체에는 다른 도체의 작용에 의하여 유도전압이 발생한다. 유도전압은 절연된 도체상의 전 전하 합이 영이 되는 것과 도체 표면의 모든 지점의 전위는 미지의 유도전압 V_i 가 되는 것을 이용하여 구한다. 전하 중첩법을 이용하여 유도전압을 구하는 방법은 절연된 도체의 내부에 가상 전하 $q_1 \sim q_m$ 를 배치하면 절연된 도체의 운

좌점 1 ~ m 에는 다른 도체의 가상 전하와 절연된 도체의 가상 전하의 작용에 의한 전압이 아래 식과 같다.

$$\sum_{j=1}^n P(1, j)q_j = v_1 = V_j$$

$$\sum_{j=1}^n P(2, j)q_j = v_2 = V_j$$

.....

$$\sum_{j=1}^n P(m, j)q_j = v_m = V_j \quad (9)$$

$$\sum_{j=0}^n q_j = 0 \quad (10)$$

식(9)에서 미지의 유도 전압 Vf를 소거하면 (m-1)개의 식이 생기고 식(10)을 합하면 m개의 윤곽점에 대하여 m개의 방정식을 만들 수 있다. 다른 도체상의 윤곽점의 전위 방정식은 통상의 전하중립법과 같은 모양으로 결국 절연된 도체를 포함한 영역 전체의 가상 전하 qj (j = 1 ~ n) 에 대해 식(11)을 만들 수 있다. 유도 전압은 이것을 풀어 얻은 전하량을 식(9)에 대입하여 계산한다.

$$\begin{pmatrix} P_{11}-P_{21} & P_{12}-P_{22} & \dots & P_{1m}-P_{2m} & \dots & P_{1n}-P_{2n} & \dots & 0 \\ I_{21}-P_{31} & P_{22}-P_{32} & \dots & P_{2m}-P_{3m} & \dots & P_{2n}-P_{3n} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots & \ddots & \vdots \\ P_{m+1,1}-P_{m1} & P_{m+1,2}-P_{m2} & \dots & \dots & \dots & P_{m+1,n}-P_{mn} & \dots & 0 \\ P_{m-1,1} & P_{m-1,2} & \dots & \dots & \dots & P_{m-1,n} & \dots & 0 \\ P_{n1} & P_{n2} & \dots & \dots & \dots & P_{nn} & \dots & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} q_1 \\ q_2 \\ \vdots \\ q_m \\ \vdots \\ q_{m+1} \\ \vdots \\ q_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \\ \vdots \\ v_{m+1} \\ \vdots \\ v_n \end{pmatrix} \quad (11)$$

표3, 표4와 표5는 각각 선로에 열차가 없을 경우와 좌측 및 우측에 열차가 있을 경우 각각 4가지 위치에 있는 절연전선에 유도되는 전압을 나타내었다.

표 3. 열차가 없을 경우 전선 위치에 따른 유도전압([kV])

위치	(16.4)	(16.8)	(20.4)	(20.8)
열차없음	0.5934	1.688	0.3727	0.5901

표 4. 좌측 선로에 열차가 있을 경우 전선 위치에 따른 유도전압([kV])

위치	(16.4)	(16.8)	(20.4)	(20.8)
상행열차 있음	0.7894	1.9778	0.4925	0.8

표 5. 우측 선로에 열차가 있을 경우 전선 위치에 따른 유도전압([kV])

위치	(16.4)	(16.8)	(20.4)	(20.8)
하행열차 있음	1.211	2.3935	0.6682	1.0334

다음 그림 4는 피유도선의 높이 및 전차선과 피유도선의 이격거리에 따라 계산된 정전유도값을 종합적으로 나타낸 것이다.

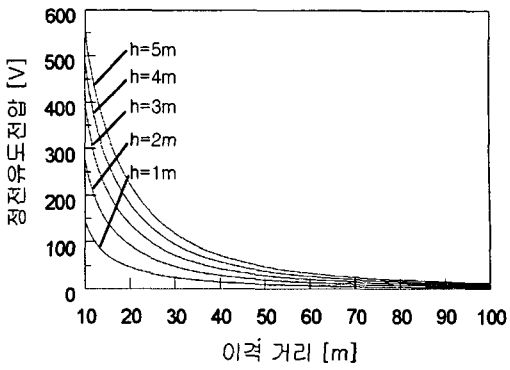


그림 4. 피유도선의 높이 및 전차선과 피유도선의 이격거리에 따른 정전유도 계산결과

위의 계산결과는 금속 차폐층이 없는 신호제어 및 통신선이 전력선과 평행하게 시설된 경우 유도전압이다. 그러나 신호제어 및 통신선이의 일부 구간만이 전력선과 평행하게 시설된 경우 신호제어 및 통신선이 전력선 노출구간과의 비 만큼 유도전압은 경감하게 된다.

5. 결론

본 연구에서 급전선로와 피유도선로간의 정전 용량을 계산하여 피유도선의 위치 변화에 따른 유도전압을 계산한 결과, 피유도선의 높이가 4m이고 최외각 피더로부터 8m정도 이격된 지점에서 열차가 없을 경우에는 정전유도전압이 370V, 열차가 있는 경우에는 490V에서 668V까지 나타남을 알 수 있었다. 실제 전차선에서 문제되는 유도장해는 후술하는 전자유도전압에 기인하며 이에 대한 신호제어 및 통신선측 대책으로서 접지된 금속차폐층을 가지는 차폐케이블을 사용하게 되는데 이 금속차폐층은 통신선 도체를 완전포위하는 구조로 되어있어 정전유도에 대해 매우 좋은 차폐효과를 가지므로 정전유도전압은 거의 0으로 된다. 또한, 전철 구간이 터널내에 시설된 경우 터널을 싸고있는 철근과 토양이 차폐케이블의 금속차폐층과 같은 차폐효과를 가지게 되므로 정전유도의 영향은 터널외부로 미치지 않게 된다. 따라서 차폐케이블로 된 신호제어 및 통신회로의 정전유도장해는 거의 없다고 여겨진다.

(참 고 문 헌)

[1] Z.Yan, B.L.Qin, X.Lin, R.Y.Weng, G.Gela "Calculation and Measurement of Field Parameters During Live-Line Maintenance" *IEEE Trans on PWRD*, Vol.6, No.3, pp.1187-1191, July, 1991
 [2] S H. Myung, B. Y. Lee, J. K.Park, S. W. Min, E. S. Kim, "Calculation of Electric-Field Induction on People in Nonuniform Electric Field of Substation." *International WROCLAW Symposium on EMC*, Poland, Europe, pp.179~183, 1996
 [3] B. Y. Lee, J. K.Park, S H. Myung, S. W. Min, E. S. Kim, "An Effective Modelling Method to Analyze Electric Field around Transmission Lines and Substation using a generalized Finite Line Charge." *IEEE Trans.on PWRD*, Vol.12, No.3, pp.1143-1150, July, 1997