

급전회로망 해석기법을 활용한 전철계통 해석

Train voltage analysis of railroad system using supply network method

윤재영¹⁾ 최홍관²⁾
Yoon, Jae-Young Choi, Heung-Kwan

ABSTRACT

This paper presents the new simulation algorithms using network methods to analysis the steady-state train voltage distribution characteristics in ac auto-transformer fed railroads. In general, the supply system of railroads is composed of non-symmetrical and unbalance transmission line. Therefore, the general method using simplified old algorithms have the self-contradictory errors because the supply line of train railroads is completely unbalanced. In this paper, the simulation results of new developed algorithms is compared with those of EMTP to confirm the effectiveness.

1. 서론

일반적인 배전계통은 3상 22.9[kV] 중성선 다중접지 방식으로 평형상태로 운전된다고 가정하면 조류해석을 위해서는 정상분만을 고려한 단상계통으로 해석할 수 있다. 그러나, 고속전철 급전계통은 한전변전소에서 Scott 변압기에 의하여 3상을 단상으로 변환하며, 단상 2×25[kV] AT(단권변압기: Auto Transformer) 급전방식이라는 특이한 형태로 구성되어 있기[1~2] 때문에 기존의 송배전 계통에서 적용하는 방법으로는 정확한 해석결과를 얻을 수 없다.

이와 같은 특성을 가진 급전계통의 정태해석 방법은 간략 계산식을 활용하거나[4], 혹은 전차선, 급전선 및 레일이 평행을 이룬다는 가정 하에서 유도한 식을 사용하여 왔다[5]. 하지만, 실제적인 급전선로는 비대칭 형태를 띄고 있기 때문에 위와 같은 가정은 모순을 지니고 있다. 따라서, 고속철도를 개발하여 실제 운용하고있는 일본(신간선), 독일(ICH), 프랑스(TGV)에서만 해당기업이 자체적으로 개발한 프로그램을 적용하고 있으며, 별도로 상용화 된 프로그램은 없다.

그러므로, 본 논문에서는 고속전철 급전회로망의 기본개념에 적용할 수 있는 새로운 해석기법을 개발하였으며, 이를 바탕으로 하여 MATLAB 프로그램을 작성하였다. 그리고, 전 세계적으로 그 정확성이 인정된 범용 과도해석 프로그램인 EMTP(Electro Magnetic Transients Program)를 사용한 해석결과와 상호 비교 분석하여 본 논문에서 개발한 급전계통 정태해석용 프로그램의 정확성을 평가하였다.

2. 급전계통 구성방식

1) 한국전기연구소 전력연구단 선임연구원
2) 한국전기연구소 전력연구단 연구원

일반적인 전기철도의 급전계통은 직접급전방식, BT급전방식 및 AT급전방식의 세 가지로 분류된다[2]. 각각의 방식은 나름대로의 장단점을 가지고 있는데, 현재 세계 각국의 고속철도는 전압강하와 통신선 유도장해 경감을 위하여 대부분 AT급전방식을 사용하고 있으며, 우리나라 역시 고속철도용 급전계통은 그림 2.1과 같은 2×25[kV] AT급전방식을 채용할 예정이다[1].

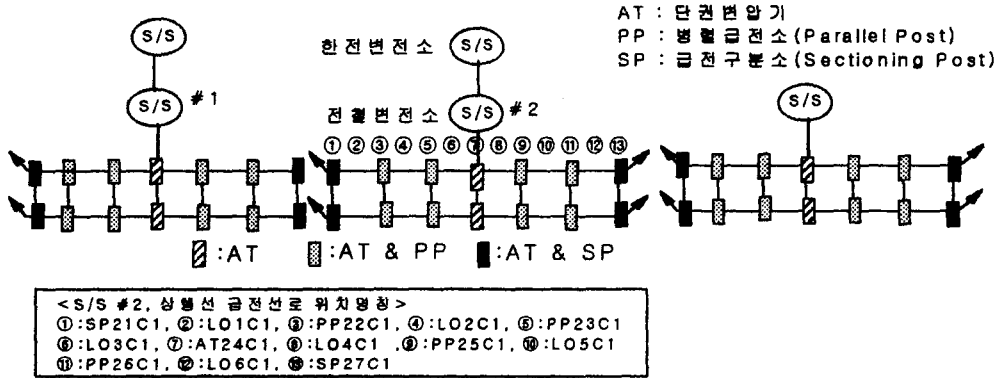


그림 2.1 급전계통 구성형태

3. 기존 급전계통 정태해석법 및 문제점

3.1 급전선로 AT 2차 환산식

이 방식은 일본의 전기철도 급전계통 해석에 적용된 방식인데, 각 도체별 자기임피던스와 상호임피던스를 가진 그림 3.1과 같은 AT급전계통에서 해석의 편의를 위하여 식 (3.1)을 적용하여 AT 2차측으로 등가화하면 그림 3.2와 같다. 또한, 식 (3.2)를 사용하여 상호임피던스를 소거하면 그림 3.3과 같이 자기임피던스만 가지게 된다. AT 2차측으로 환산하는 유도식은 문헌[6]을 참조하기 바란다.

$$\begin{aligned}
 Z'_{cc} &= Z_{cc} \quad , \quad Z'_{cr} = Z'_{rc} = Z_{cr} \\
 Z'_{cf} &= Z'_{fc} = \frac{Z_{fc} + Z_{cc}}{2} \\
 Z'_{rr} &= Z_{rr} \quad , \quad Z'_{rf} = Z'_{fr} = \frac{Z_{rf} + Z_{cr}}{2}
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

$$\begin{aligned}
 Z'_{ff} &= \frac{Z_{ff} + 2*Z_{fc} + Z_{cc}}{4} \\
 Z_c &= Z'_{cc} + Z'_{rf} - Z'_{cr} - Z'_{fc} \\
 Z_r &= Z'_{rr} + Z'_{fc} - Z'_{rf} - Z'_{cr} \\
 Z_f &= Z'_{ff} + Z'_{cr} - Z'_{fc} - Z'_{rf}
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

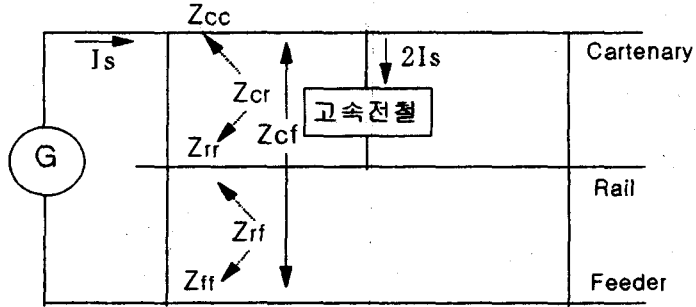


그림 3.1 AT변압기를 포함하는 급전계통

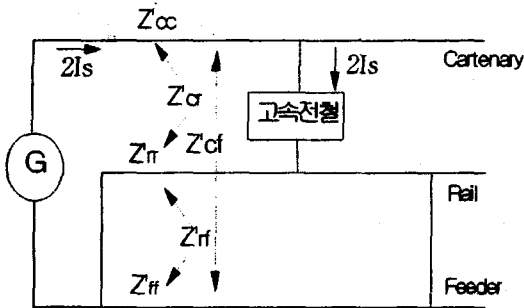


그림 3.2 AT변압기 2차측 환산 등가회로

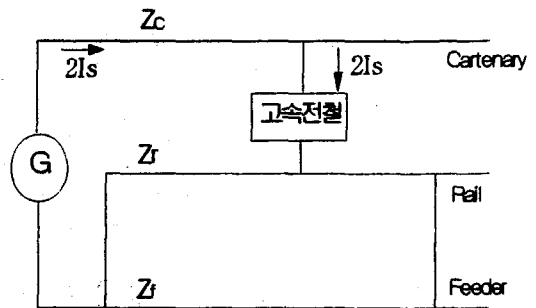


그림 3.3 상호임피던스를 제거한 등가회로

2. 간략 계산식을 이용한 방법

전기철도의 전압강하를 계산하기 위하여 사용되고 있는 방법으로서 이 방법은 AT 2차 환산식의 기본적인 모순과 간략 계산식이 내포하고 있는 기본가정, 즉 모든 열차의 소비전류는 동일하며 열차가 동일간격으로 배치되어 있다는 가정에서만 유효하다는 단점을 가지고 있다. 급전선로의 임피던스를 AT 2차측으로 환산한 그림 3.4를 기준으로 하여 식 (3.3)과 같은 간략 계산식을 적용할 수 있다.

$$\Delta V_N = I * (Z_L * \sum_{j=1}^N I_N + Z_{L1} * \frac{D_N - X_N}{D_N}) \quad (3.3)$$

여기서, ΔV_N : N번째 구간에 있는 열차의 전압강하분

I_N : cartenary 전류 ($I = I_1 = I_2 = \dots = I_N$)

$$Z_L = Z_c + \frac{Z_r * Z_f}{Z_r + Z_f}, \quad Z_{L1} = \frac{Z_r * Z_r}{Z_r + Z_f}$$

D_N : N번째 급전구간의 거리[kM]

X_N : N번째 AT와 N번째 열차사이의 거리[kM]

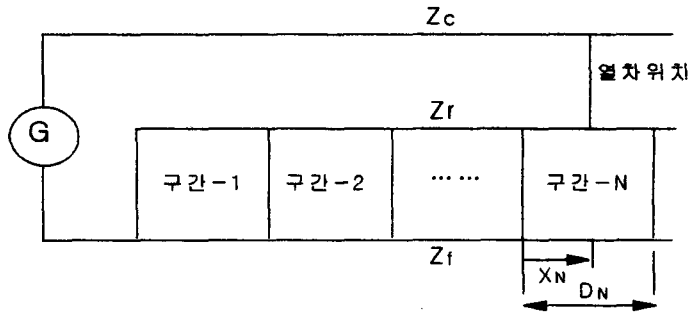


그림 3.4 간략 계산식을 적용한 계통예

위에서 언급한 모순점과 더불어 식 (3.3)에서 급전선로의 전압강하는 $\frac{D_N - X_N}{D_N}$ 에 비례하는 것으로 나타내었는데, $Z_c = Z_r = Z_f$ 및 $Z_{cr} = Z_{cf} = Z_{rf}$ 이 성립하는 완전대칭 및 평형선로에서만 정확하게 성립하는 식이라고 할 수 있다. 그러나, 실제로 급전선로는 완전 비대칭이므로 식 (3.3)은 정확한 해석방법은 아니며, 근사 계산식이 된다.

4. 급전 회로망 해석알고리즘

1. 급전선로 전류식 유도

그림 4.1의 ㉠개 AT에서 각각의 AT전류를 I_1, I_2, \dots, I_N 으로 표현할 수 있으며, 각 노드별로 AT 2차측 환산전후의 전차선(cartenary), 레일(rail), 급전선(feeder) 전류를 구하면 식 (4.1)~(4.2)와 같다. 식 (4.1)~(4.2)에서 각 도체군별 전류의 합은 ($I_{C,k} + I_{R,k} + I_{F,k} = 0$ 및 $I_C + I_R + I_F = 0$) 제로이다. 또한, cartenary 전류와 feeder 전류는 AT 2차측 환산 전·후에 변하지만 rail 전류는 변동이 없음을 알 수 있다. 만약, 전체 열차갯수를 M개라고 하면 열차부하가 전형적인 정전력부하의 특성을 가지고 있기 때문에, 개별적인 열차전류는 다음의 식 (4.3)과 같이 전압의 함수로써 표현할 수 있다.

$$I_{T,k} = \frac{S_{T,k}^*}{V_{T,k}^*} \quad (4.3)$$

여기서, $I_{T,k}$: k번째 열차전류

$V_{T,k}$: k번째 열차전압 ($V_{T,k} = V_{c,k} - V_{r,k}$)

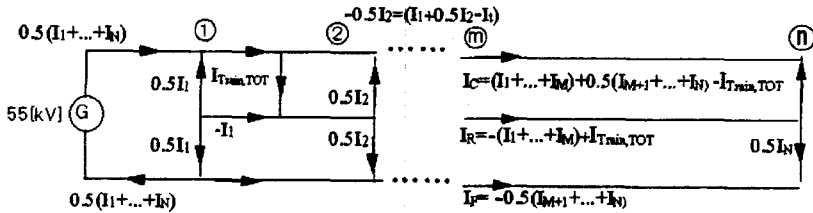
$S_{T,k}^*$: k번째 열차의 소비전력 ($S_{T,k} = P_{T,k} + jQ_{T,k}$)

$$\begin{aligned} I_C &= (I_1 + \dots + I_m) + 0.5(I_{m+1} + \dots + I_n) - I_{T,tot} \\ I_R &= -(I_1 + \dots + I_m) + I_{T,tot} \\ I_F &= -0.5(I_{m+1} + \dots + I_n) \end{aligned} \quad (4.1)$$

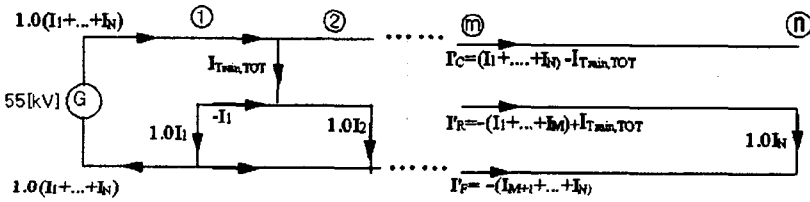
$$I'_C = (I_1 + \dots + I_n) - I_{T,tot}$$

$$\begin{aligned}
 I'_R &= -(I_1 + \dots + I_m) + I_{T,tot} \\
 I'_F &= -(I_{m+1} + \dots + I_n)
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

여기서, I_C, I'_C : AT 2차측 환산전·후의 각 노드별 cartenary 전류
 I_R, I'_R : AT 2차측 환산전·후의 각 노드별 rail 전류
 I_F, I'_F : AT 2차측 환산전·후의 각 노드별 feeder 전류
 I_1, I_2, \dots, I_n : 각 AT노드 전류
 $I_{T,tot}$: ①~㉓노드 사이에 존재하는 모든 열차전류의 합



<AT 2차측 환산전 전류분포 : V_{CRF} & Z_{CRF} & I_{CRF} >



<AT 2차측 환산전 전류분포 : V_{CRF} & Z'_{CRF} & I'_{CRF} >

그림 4.1 N개 AT 노드에서 각 노드별 전류분포

또한, 전체 열차전류와 전체 AT전류의 크기는 동일해야 하므로 식 (4.4)가 성립한다. 식 (4.4)에서 개별 AT전류를 구하면, k번째 AT전류의 경우 식 (4.5)와 같이 표현할 수 있다. 그리고, $I_{RR,i}$ 는 식 (4.6)에 나타내었듯이, k번째 AT노드에서 레일도체의 입출력 전류차 이다.

$$\sum_{k=1}^N I_{T,k} = -2 * \sum_{k=1}^M I_{AT,k}
 \tag{4.4}$$

$$I_{AT,k} = \frac{\sum_{k=1}^N I_{T,k} + \sum_{i=1, i \neq k}^M I_{RR,i}}{-2}
 \tag{4.5}$$

$$I_{RR,k} = I_{R,k} - I_{R,(k-1)}
 \tag{4.6}$$

이와 같은 급전선로의 전압강하를 수식으로 표현하면 식 (4.7)과 같이 되며 전류벡터 $[I_{CRF}]$ 는 위에서 기술하였듯이 전압의 함수로 표현 가능하므로, 식 (4.7)은 비선형연립 대수 전압방정식이 된다. 따라서, 전원단 전압이 정해지면 순차적으로 각 도체군별 전압 $[V_{CRF}]$ 가 구해지며 각 노드별 전류 $[I_{CRF}]$ 도 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} [V_{CRF,k}] &= [V_{CRF,k-1}] - \Delta [V_{CRF,k}] \\ &= [V_{CRF,k-1}] - [Z_{CRF}] * [I_{CRF,k-1}] * (Length) \end{aligned} \quad (4.7)$$

여기서, $\Delta [V_{CRF,k}] = [V_{CRF,k-1}] - [V_{CRF,k}]$: (k-1)과 k번째 노드 전압강하분
 $[V_{CRF,k}] = [V_{C,k} \ V_{R,k} \ V_{F,k}]$: k번째 노드의 cartenar, rail, feeder 대지전위
 $[I_{CRF,k-1}] = [I_{C,k-1} \ I_{R,k-1} \ I_{F,k-1}]$: (k-1)과 k번째 노드사이의 cartenar,
 rail, feeder 선로전류

$$[Z_{CRF}] = \begin{bmatrix} Z_{CC} & Z_{CR} & Z_{CF} \\ Z_{RC} & Z_{RR} & Z_{RF} \\ Z_{FC} & Z_{FR} & Z_{FF} \end{bmatrix} : \text{급전선로 단위길이당 자기 및 상호임피던스}$$

2. 급전회로망 해석알고리즘

- M : AT 개수, N : 열차갯수
- $I_{T,k}, I_{AT,k}$: k번째 Node의 열차전류 및 AT전류
- P_k : k번째 Node 위치[kM]
- $I_S = \sum_{k=1}^M (-I_{AT,k})$: 전원단 전류
- $V_{CRF,k} = [V_{C,k}; V_{R,k}; V_{F,k}]$: k번째 Node의 cartenary, rail, feeder도체 전위
- $I_{CRF,k} = [I_{C,k}; I_{R,k}; I_{F,k}]$: k번째에서 (k+1)번째 Node로 흐르는 도체전류
- $\Delta V_{CRF,k} = V_{CRF,k+1} - V_{CRF,k}$: k번째와 (k+1)번째 Node 사이의 전압강하

(단계1) (M+N)개 Node에 대한 전압초기치 가정

$$V_{CRF,1}, V_{CRF,2}, \dots, V_{CRF,(M+N)} = 1.0+j0.0 \text{ [pu]}$$

(단계2) 열차전류 정의 : $I_{T,k} = \frac{S_{T,k}^*}{V_{T,k}^*} = \frac{S_{T,k}^*}{(V_{C,k} - V_{R,k})^*}$

(단계3) I_R 계산 : $I_{CRF,k} = [(P_{k+1} - P_k) * Z_{CRF,k}]^{-1} * \Delta V_{CRF,k}$

(단계4) AT전류 정의 : $\sum_{k=1}^N I_{T,k} = -2 * \sum_{k=1}^M I_{AT,k}$ 에서,

$$I_{AT,k} = \frac{\sum_{k=1}^N I_{T,k} + \sum_{i=1, i \neq k}^M I_{RR,i}}{-2}, \quad I_{RR,k} = I_{R,k} - I_{R,(k-1)}$$

(단계5) $I_{CRF,k} = [I_{C,k}; I_{R,k}; I_{F,k}]$ 구함

(1) $I_{C,k}$ 계산 ($k=1, 2, 3, \dots, M+N-1$)

- ① k=1인 경우 : $I_{C,1} = I_S - I_{AT,1}$
- ② k가 열차Node인 경우 : $I_{C,k} = I_{C,(k-1)} - I_{T,k}$
- ③ k가 AT Node인 경우 : $I_{C,k} = I_{C,(k-1)} - I_{AT,k}$

(2) $I_{R,k}$ 계산 ($k=1, 2, 3, \dots, M+N-1$)

- ① k=1인 경우 : $I_{R,1} = 2 * I_{AT,1}$
- ② k가 열차Node인 경우 : $I_{R,k} = I_{R,(k-1)} + I_{T,k}$
- ③ k가 AT Node인 경우 : $I_{R,k} = I_{R,(k-1)} + 2 * I_{AT,k}$

(3) $I_{F,k}$ 계산 ($k=1,2,3,\dots,M+N-1$)

① $k=1$ 인 경우 : $I_{F,1} = \sum_{k=2}^M I_{AT,k}$

② k 가 열차Node인 경우 : $I_{F,k} = I_{F,(k-1)}$

③ k 가 AT Node인 경우 : $I_{F,k} = I_{F,(k-1)} - I_{AT,k}$

(단계6) (단계5)의 $I_{CRF,k} = [I_{C,k}; I_{R,k}; I_{F,k}]$ 에서 $V_{CRF,k} = [V_{C,k}; V_{R,k}; V_{F,k}]$ 를 계산

(1) $i = 1$ (첫번째 AT노드)인 경우

$$V_{C,1} = \frac{V_S}{2} - \frac{Z_S}{2} * I_S - P_1 * (Z_{CC} - Z_{CF}) * I_S$$

$$V_{R,1} = \frac{V_{C,1} + V_{F,1}}{2}$$

$$V_{F,1} = -\frac{V_S}{2} + \frac{Z_S}{2} * I_S - P_1 * (Z_{FC} - Z_{FF}) * I_S$$

(2) $i = k+1$ (열차 Node인 경우)

$$V_{CRF,(k+1)} = V_{CRF,k} - (P_{(k+1)} - P_k) * Z_{CRF} * I_{CRF,k}$$

(3) $i = k+1$ (AT Node인 경우)

$$V_{C,(k+1)} = V_{C,k} - (P_{(k+1)} - P_k) * (Z_{CC} * I_{C,k} + Z_{CR} * I_{R,k} + Z_{CF} * I_{F,k})$$

$$V_{R,(k+1)} = \frac{V_{C,(k+1)} + V_{F,(k+1)}}{2}$$

$$V_{F,(k+1)} = V_{F,k} - (P_{(k+1)} - P_k) * (Z_{FC} * I_{C,k} + Z_{FR} * I_{R,k} + Z_{FF} * I_{F,k})$$

(단계7) 모든 전압 $V_{CRF,k} = [V_{C,k}; V_{R,k}; V_{F,k}] (i=1,2,3,\dots,M+N)$ 가 수렴할 때까지 (단계2)~(단계6)을 반복 수행한다.

5. 사례연구

본 논문에서 제시한 방법의 유용성을 확인하기 위하여 <급전회로망 방식>과 <EMTP 해석> 결과를 상호 비교하였다. 여기서 전 세계적으로 공인된 범용 과도해석 프로그램인 EMTP 해석결과는 본 논문에서 제안한 <급전회로망 해석방법>의 정확성을 판단하기 위한 기준치이다. <일본방식>의 경우는 비대칭인 급전선로를 평형으로 가정하고 수식을 전개한 것이므로 원천적으로 오차를 가지고 있는 경우이므로 비교대상이 아니다.

5.1 해석 대상계통

본 논문에서 사용한 해석대상계통 및 사용된 정수는 아래와 같으며, 급전선로의 도체별 사양은 참조문헌[1]에서 사용한 데이터를 그대로 적용하였다.

- 해석대상계통 : 그림 2.2의 급전계통
- 전철변전소 간격 : 48[kM]
- 단권변압기 간격 : 8[kM]
- 전원단 송출전압 : 55[kV] (50[kV]의 1.1[PU])
- 단권변압기정격 : 10[MVA], %Z=5.9(%)
- 전철 1편성 부하 : 15+j3 [MVA] (정전력부하)

5.2 사례연구 결과

(1) 사례-1 (상행선 단독급전 계통, 열차위치 : 3, 10, 17[km])

표 5.2 급전계통 해석결과 (다수 AT구간, 3개 열차)

항 목	<급전회로망 방식>	<EMTP 모델>
열차전압[kV]	26.704-j1.170 25.860-j2.406 25.433-j3.014	좌 동
열차전류[A]	538.95-j130.22 516.84-j152.01 505.73-j162.70	좌 동

(2) CASE-7 : (상하행선 병렬급전 계통,

■ 열차위치 : 상행선 3, 10, 17[km], 하행선 4, 11, 18[km])

표 5.3 상하행선 병렬급전계통 해석결과 (상행선 3개, 하행선 3개 열차)

항 목	<급전회로망 방식>	<EMTP 모델>
열차전압[kV]	26.897-j0.995 26.774-j1.193 26.401-j1.779 26.322-j1.901 26.155-j2.163 26.111-j2.227	좌 동
열차전류[A]	452.91-j106.17 434.56-j105.33 354.91-j94.630 346.64-j94.220 314.76-j89.090 312.53-j89.320	좌 동

5. 결 론

본 논문에서는 고속철도 급전계통의 정태해석을 위한 급전회로망 해석기법을 도입하고 이를 사례연구를 통하여 EMTP 해석결과와 비교하여 그 정확성을 검증하였다.

- (1) 과거 급전계통의 전압강하를 계산한 방법은 급전선로의 비대칭 및 불평형성을 무시한 것으로서 실제 결과와는 오차를 나타내므로 본 논문에서는 보다 정확한 급전계통 정태해석방법을 유도하였다.
- (2) 본 논문은 급전회로망 해석기법을 적용하여 열차전압 및 전류를 해석할 수 있는 새로운 급전계통 정태해석 알고리즘을 정립하였다. 그리고, 본 논문에서 유도한 알고리즘을 적용한 해석결과와 EMTP 해석결과를 상호 비교함으로써 그 정확성을 입증하였다.
- (3) 향후, 본 논문에서 고안한 급전계통의 정태해석 방법을 확장하여 고장해석 및 동태해석 알고리즘의 개발이 필요할 것으로 생각된다.

<참고문헌>

- [1] 한국고속철도 건설공단, "고속철도 연구보고서(전기분야)", 1996. 2
- [2] 한국전기연구소, "경부 고속전철용 전력공급의 비용절감 방안 연구", 1992. 10
- [3] Charles A. Gross, "Power System Analysis", 1979
- [4] 일본전기학회, "직류전기철도의 보호 및 보호협조 연구", 1995. 5
- [5] J.D.Glover, A.Kusko, S.M.Peeran, "Train Voltage Analysis for AC Railroad Electrification", IEEE ISAA2:ISA, 1982
- [6] 한국전기연구소, "급전시스템 해석기술 개발", 1999. 10
- [7] BPA, EMTP Rule Book, 1985
- [8] University of Wisconsin, EMTP Theory Book