

교류 전기철도 시스템의 해석에 적합한 조류계산 기법 및 STATCOM을 적용한 전압 강하 개선 연구

論 文

56-4-5

A Study on a New Power Flow Method for Analysis of AC Electric Railway System and Improvement of Voltage Drop Using a STATCOM

李 丙 河[†] · 白 正 明^{*}

(Byung Ha Lee · Jung-Myoung Baek)

Abstract - This paper presents a new power flow method to analyze the AC electric railway system effectively in both cases of traction and regenerative braking of the trains. The algorithm to easily solve the power flow of the AC electric railway system with the trains of regenerative braking from the system without a train of regenerative braking is derived. Using this new power flow method, the voltage characteristics of a typical AC electric railway system is easily analyzed in both cases of traction and regenerative braking of the trains. We show that the presented method can be applied effectively in order to analyze the AT-fed AC electric railway system in both cases of traction and regenerative braking of the trains. A STATCOM(Static Synchronous Compensator) is applied to the system in order to improve the voltage drop problem and this case is also analyzed to show the effect of STATCOM.

Key Words : AC electric railway system, power flow method, regenerative braking, voltage drop, STATCOM

1. 서 론

현대 산업의 발전과 함께 인구의 대도시 집중화 현상과 물류량의 급속한 증가를 가져오게 되었고, 대규모 교통시스템의 활용이 증대되어왔다. 이러한 추세에서 전기 철도 시스템이 다른 교통시스템에 비해 수송능력, 에너지 효율, 환경친화적인 면에서 많은 이점들을 가지고 있어서 수도권을 중심으로 확산되어 가고 있다.

전기철도 시스템은 직류급전방식과 교류급전방식이 있으며 세계적으로 볼 때 교류급전 방식이 약 60%로서 좀더 많다. 직류급전 방식은 통신유도장해가 없다는 장점이 있어서 대도시 내에서 많이 적용되고 있으나 전압이 낮아 부하전류가 크게 되고 전압강하도 크며 장거리 급전 선로에 적용하기 어려운 문제점이 있다. 교류 급전 방식은 주로 장거리 주요간선에 적용되고 있으며, 도시 철도 시스템에서 변전소의 공급거리를 연장시키는 수단으로 AT(Auto Transformer, 단권변압기) 급전방식이 적용되고 있는데, 국내에서도 도시 철도에서 교류의 AT 급전방식이 많이 채택되고 있다.

일반적으로 송배전 시스템은 3상 평형부하인 반면에 전기 철도 부하는 단상 대용량 집중부하로 전철화 구간에서 운행하는 전기차는 급전 계통에서 보면 이동과 정지를 반복하는 집중부하이므로 전기적 변화가 매우 심하고 한 급전 구간에 여러 편성의 차량이 운행 할 때 차량 상호간의 영향으로 전기적 특성이 수시로 변하는 특징을 가지고 있다.

이는 필연적으로 전압강하 및 전압강하 및 전압변동과 불평형 등 급전품질 저하 문제를 야기하며 기기 성능 및 제어

와 신호계통에 나쁜 영향을 줄 수 있으며, 이에 대한 연구들이 국내외에서 수행되어 왔다.

전기철도 교류급전 시스템의 전압 분포특성을 모델링하는 시뮬레이션 알고리즘이 제시되고 간단히 하나의 전기차가 운행되고 있는 케이스에 대하여 분석하였다[1]. 전력의 동요를 줄이기 위하여 SMES에 퍼지제어기를 적용하는 기법에 대한 연구가 발표되기도 하였으나, 현재 기술 수준으로 실 적용과는 거리가 있다[2].

복잡한 전기철도 시스템을 분석하기 위해 EMTP나 EMTDC 프로그램을 활용하는 연구가 수행되어 왔다. EMTDC를 활용하여 표준적인 운전사례 연구를 수행하고 급전계통의 전압강하를 해석하고 급전계통 구성 방식과 모델링에 대하여 고찰하였고[3], EMTDC를 활용하여 전기철도 시스템의 사고 전류를 해석하였다[4]. 그리고 범용 프로그램을 사용하여, 전기철도 교류급전시스템의 시뮬레이터 구축을 위한 해석기법으로서 폐회로 해석법과 마디해석법에 대한 수식을 정립하고, 급전시스템의 회로 등가화와 전기차 부하의 정전력모델을 적용하여 교류급전시스템의 해석에 대한 연구를 수행하였다[5]. 도시 철도가 아닌 고속 전철에 대하여 계통의 안정도 향상과 STATCOM 적용시의 효과에 대하여 분석하였다[6]. 직류 전기 철도의 해석을 위하여 회생 제동 차량을 포함하는 DC 전력조류계산 해석 알고리즘이 제안되었다[7].

교류 전기철도 시스템은 급전선, 전차선, 조가선, 레일, 단권변압기, 차량부하 등으로 복잡하게 구성되어 있고, 특이한 AT 급전방식으로 구성되어 있으며, 도체들 간의 상호임피던스도 고려해야 하고 차량부하가 급격히 변하는 점 등으로 해서 기존의 대규모 전력시스템의 해석에서 사용되고 있는 조류계산 프로그램을 적용할 수가 없다.

전철 급전계통의 현재 까지 적용되어온 대표적인 전기 철도 시스템의 해석기법으로 폐회로해석법과 마디해석법을 들 수 있는데, 마디 해석법의 경우 미지수의 개수가 폐회로 해석법의 개수보다 많아 폐회로해석법이 더 널리 사용되고 있다.

[†] 교신저자, 終身會員 : 仁川大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

E-mail : bhlee@incheon.ac.kr

^{*} 學生會員 : 仁川大 工大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2007年 3月 11日

最終完了 : 2007年 3月 20日

이러한 해석법들이 사용되고 있으나, 차량부하는 부하가 급격히 변화하며, 또한 회생제동차량의 등장으로 회생제동 시에는 부하의 역할에서 전원의 역할로 변하게 되고, 각 차량 부하마다 부하와 전원의 역할을 수시로 반복하게 되는데, 이러한 점들을 효과적으로 해결하는 기법이 고려되지 않고 있다. 지금까지는 이러한 특성에 잘 부합하는 교류 전기 철도 시스템의 전력 조류 계산 알고리즘이 적용되지 않았다. 본 논문에서는 이러한 점을 효과적으로 해결하는 새로운 교류 전기 철도 시스템의 전력 조류 계산 기법을 제안한다. 그리고, 급격한 전기차의 부하변동으로 인한 전압 강하와 전압 동요 현상이 발생하고 있으므로 전압 변동이 여러 가지 문제를 일으킬 수 있다. 따라서, 이 기법을 적용하여 전기차가 기동 시의 전압 변동에 대하여 분석한다. 이 기법을 적용하여 회생 제동 차량이 있는 교류 전기 철도 시스템의 전압 변화 특성을 해석하고 전압 제어에 효과적인 STATCOM을 설치하여 전압 강하의 문제를 개선하는 방안에 대하여 분석한다.

2. 전기철도 교류 급전 시스템의 구성 및 모델링

2.1 전기철도 교류 급전시스템 구성

교류방식은 일반적으로 한전 변전소로부터 수전하는 상용 주파수 3상 전기를 변환장치에 의해 단상 교류전기를 전차 선로에 공급하여 운전하는 방식이다. AT 급전방식을 채택하면 전철 변전소의 공급전압이 전철 부하 사용전압인 27.5[kV]의 두배인 55[kV]이므로 전압강하가 감소하고 단권 변압기의 사용으로 양방향성 전원형태가 되어 급전구간을 증가시킬 수 있으므로, 직류를 사용하는 대도시 내부의 지하철을 제외한 대부분의 도시 전철에서 교류인 AT 급전방식이 많이 채택되고 있다. AT 급전방식은 변전소에서 급전선(Feeder)을 선로를 따라 가선하여 이 급전선과 전차선 사이에 약 10[km] 간격으로 AT를 병렬로 설치 접속하여 변압기 권선의 중성점을 레일에 접속하는 방식으로서 우리나라의 수도권 전철 및 중앙선 제천~영주, 영동선 영주~철암간과 경부고속철도의 급전방식으로 채택되고 있으며 앞으로 계획되는 전철구간에도 이 방식이 널리 채용될 예정이다. 교류 AT 급전 시스템의 구성도는 그림 1과 같다. 한전 계통의 전철변전소에서 공급된 154[kV] 전압을 스코트변압기를 통하여 55[kV]로 변압하여 단상의 AT변압기에 공급한다. 단권 변압기는 약 10[km] 간격으로 설치되고 변전소간의 거리는 약 50[km]간격이고 중간에 급전구분소(SP)의 개폐설비를 두어 운전한다. 이 개폐설비는 변전소 고장 시 인근 변전소에서 연장급전을 가능하게 해 주는 등의 역할을 한다. AT변압기로부터 권선의 한쪽은 전차선에, 다른 한쪽은 급전선에 접속하고 가운데의 중성점은 레일에 접속한다.

2.2 전기철도 교류 급전시스템 회로 모델링

대표적인 전기 철도 시스템의 해석기법인 페로해석법을 적용하기 위하여 위의 교류 AT 급전 시스템을 일반화된 회로모델로 나타내면, 아래 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

그림 2에서 V_g 는 한전시스템의 전철 주변압기에서 전원측으로 본 등가전원이고, Z_g 는 등가 임피던스이다. V_1 은 AT 단권변압기 2차 측 권선의 전압이며, 2차 측은 전차선-레일, 레일-급전선 단자에 각기 27.5 [kV]로 분압된다. Z_{AT} 는 AT 단권변압기의 내부 임피던스이고, Z_{C1} , Z_{Cn} , Z_{m1} 은 각각 구획 1의 전차선의 임피던스, 구획 1의 급전선의 임피던스,

구획 1의 레일의 임피던스를 나타내고 4대의 AT 변압기가 있다.

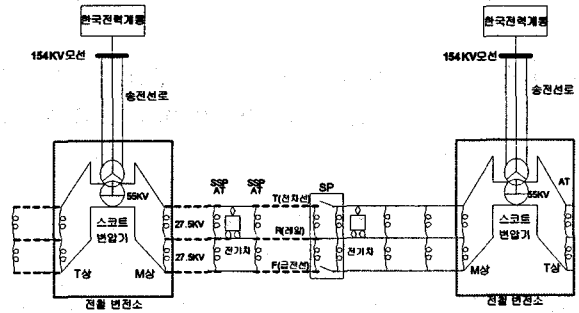


그림 1 교류 AT 급전 시스템의 구성
Fig. 1 Structure of AT-fed AC electric railway system

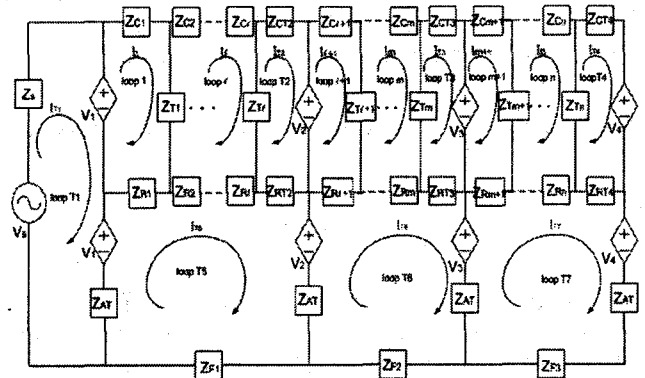


그림 2 교류 AT 급전 시스템의 일반화된 회로 모델
Fig. 2 A generalized electric circuit model of AT-fed AC electric railway system

Z_{CT2} 와 Z_{RT2} 는 선로 임피던스의 구분을 위해 우측으로 이동하면서 AT 변압기2에 접하는 구획의 전차선의 임피던스와 레일의 임피던스를 각각 나타낸다. Z_{T1} 은 전기차 1의 임피던스를 나타낸다. I_m 과 I_{T1} 은 각각 루프 m과 루프 T1의 전류를 나타낸다. 전기차는 AT 변압기1과 AT 변압기2 사이의 구획에 l대가 존재하고, 전 구역 합하여 n 대가 존재한다.

3. 교류 급전 시스템의 조류계산 기법

3.1 교류 전기철도 시스템의 페로 해석 기법

그림 2의 교류 AT 급전 시스템의 일반화된 회로에 대하여 페로해석법을 적용하기 위하여 독립적인 루프들을 구성하여 보면, 각 전기차를 포함하는 n개의 독립적인 루프가 존재하고, 나머지 독립적인 루프로서 전원을 포함하는 하나의 독립적인 루프와 우측으로 이동하면서 다음의 단권변압기를 포함하게 되는 6개의 독립적인 루프가 존재한다. 따라서 모두 n+7개의 독립적인 루프가 존재하게 된다. 각 독립적인 루프마다 페로 방정식을 세울 수 있다. 미지수는 각 루프 전류인 n+7개의 전류와 각 단권 변압기의 전압인 4개의 전압으로서 총 n+11개의 미지수가 존재한다. 이 미지수들의 값을 구하기 위하여서는 4개의 방정식이 더 필요한데, 단

권 변압기의 특성에서 유도할 수 있다. 교류 AT 급전 시스템의 단권 변압기는 1-2차 권수비가 2 : 1 이고 중성선이 정 중앙에 접속되어 있고 상하로 동일하므로 이러한 단권 변압기의 특성으로부터 아래와 같은 4개의 전류식이 추가된다[5],[8].

$$2I_{T1} - I_1 - I_{T5} = 0 \tag{1}$$

$$I_{T2} + I_{T5} - I_{m+1} - I_{T6} = 0 \tag{2}$$

$$I_{T3} + I_{T6} - I_{n+1} - I_{T7} = 0 \tag{3}$$

$$I_{T4} + I_{T7} = 0 \tag{4}$$

$n+7$ 개의 폐로 방정식과 위의 4개의 관계식 (1)-(4)로부터 식을 정리하면 아래 형태의 행렬식이 구성된다.

$$\begin{bmatrix} 0 \\ \vdots \\ 0 \\ V_s \\ \vdots \\ 0 \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{1,1} & A_{1,2} & \cdots & A_{1,n+1} \\ A_{2,1} & A_{2,1} & \cdots & A_{2,n+1} \\ \vdots & \vdots & \cdots & \vdots \\ A_{n+1,1} & A_{n+1,2} & \cdots & A_{n+1,n+1} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{T1} \\ \vdots \\ I_{T7} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_4 \end{bmatrix} \tag{5}$$

위 행렬식에서 첫 n 개의 방정식들은 n 개의 전기차가 포함되어 있는 loop 1에서 loop n 까지의 폐회로 방정식들이고, 다음의 7개의 방정식들은 전원 V_s 를 포함하며, loop T1에서 loop T7까지의 폐회로 방정식들이다. V_1 부터 V_4 까지의 변수들은 마지막 단권 변압기의 특성으로부터 나온 4개의 전류식 (1)-(4)에는 나타나지 않으나 $n+7$ 개의 루프에 대한 폐회로 방정식 내에 나타나게 된다.

위 행렬식을 편의상 기호를 사용하여 아래의 행렬식으로 표현한다.

$$Y = AX \tag{6}$$

여기서 Y 는 V_s 가 포함되어 있는 기지의 벡터이고, X 는 루프 전류 변수들과 V_1 부터 V_4 까지의 변수들이 포함되어 있는 미지수의 벡터이다. 행렬 A 는 급전선, 전차선, 레일, 단권변압기, 전기차 등의 임피던스와 이들 간의 상호임피던스들이 포함되고 AT 변압기의 전압인 V_1 부터 V_4 까지의 변수들과 관련된 계수들이 포함된다. 전기차의 부하 임피던스 Z_T 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$Z_T = \frac{|V_T|^2}{S^*} \tag{7}$$

여기서, $|V_T|$ 는 전기차 부하에 공급되는 전압의 크기이고, S^* 는 전기차 부하를 복소수로 표현한 피상전력의 공액복소수의 값이다. 위의 식들을 사용하여 반복계산법을 적용하여 루프 전류와 단권변압기의 전압 변수들에 대한 해 X 를 구하게 된다 [5],[8].

3.2 새로운 교류 전기철도 시스템의 조류계산 기법

전기차의 부하가 결정되어 있고, 부하로서만 동작하면 이

식으로써 해를 구할 수 있으나, 회생제동 운전 시에는 전기차의 부하가 발전으로 변해야 되며, 행렬식을 다시 구성해야 한다. 이 작업은 상당히 번거롭고 시간이 걸리는 작업이다. 더구나 모든 전기차들이 회생제동을 할 수 있으므로 그때마다 행렬식들을 재구성하는 것은 아주 힘 드는 일이다.

이 문제를 해결하기 위하여 먼저 루프 전류변수들을 변환시킨다. 각 전기차를 포함하는 n 개의 루프에 일치하는 루프 전류변수들을 전기차에 흐르는 전류로 나타내면, 좌측에서 우측으로 이동하면서 루프를 고려할 때 아래와 같이 표현된다.

i) 전기차와 다음의 전기차 사이에 AT변압기가 없는 경우

$$I_{L1} = I_1 - I_2 \tag{8}$$

⋮

$$I_{L,n-1} = I_{n-1} - I_n$$

여기서, I_{L1} 은 전기차 1에 흐르는 전류이다.

ii) 전기차와 다음의 전기차 사이에 AT변압기가 있거나, 마지막 전기차인 경우

$$I_{L1} = I_1 - I_{T2} \tag{9}$$

⋮

$$I_{L,n} = I_n - I_{T4}$$

전류변수들 간의 관계를 행렬식을 사용하여 나타내면 아래와 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} I_{L1} \\ \vdots \\ I_{L,n} \\ I_{T1} \\ \vdots \\ I_{T7} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & -1 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 1 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 0 & 0 & \cdots & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ \vdots \\ I_n \\ I_{T1} \\ \vdots \\ I_{T7} \\ V_1 \\ \vdots \\ V_4 \end{bmatrix} \tag{10}$$

위 행렬식을 편의상 기호를 사용하여 아래의 행렬식으로 표현한다.

$$\tilde{X} = MX \tag{11}$$

여기서 \tilde{X} 벡터는 위 식 (10)의 좌변의 전기차에 흐르는 전류인 $I_{L1}, \dots, I_{L,n}$ 의 변수가 포함되어 있는 벡터이고, M 은 위 식 (10)의 우변에 있는 정수들로 구성된 정방 행렬이다. 기존의 미지수 벡터 X 를 새로운 미지수 벡터 \tilde{X} 로 나타내면,

$$X = M^{-1}\tilde{X} \tag{12}$$

따라서, 위의 식 (6)은 아래와 같이 표현된다.

$$Y = AX = AM^{-1}\tilde{X} = \tilde{A}\tilde{X} \tag{13}$$

여기서,

$$AM^{-1} = \tilde{A} \tag{14}$$

이다.

이렇게 표현된 수식은 전기차에 흐르는 전류인 I_{L1}, \dots, I_{Ln} 의 변수로 표현된 것이다. 이 식 (13)을 사용하여 반복계산법을 적용하여 루프 전류와 단권변압기의 전압 변수들에 대한 해 \tilde{X} 를 구함으로써 전기철도 시스템의 정태해석을 할 수 있다. 이렇게 표현된 경우 전기차의 전압은 거의 정격전압의 근처의 허용범위 내에 존재하므로 전기차에 흐르는 전류인 I_{L1}, \dots, I_{Ln} 은 전기철도의 전력과 비례하는 값으로 고려될 수 있고, 이 역으로도 고려할 수 있어서 분석에 더욱 편리하다. 무엇보다도 이 변환의 핵심적인 사항은 회생제동시의 해석을 이 모델식을 그대로 활용하여 즉시 수행할 수 있다는 점이다. 이 알고리즘은 아래와 같다.

수식을 유도하기 위하여 j 번째 전기차가 회생제동으로 운전된다고 가정한다. 위의 식 (13)은 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_j \\ \vdots \\ Y_r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{1,1} & \dots & \tilde{A}_{1,j} & \dots & \tilde{A}_{1,r} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{A}_{j,1} & \dots & \tilde{A}_{j,j} & \dots & \tilde{A}_{j,r} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots \\ \tilde{A}_{r,1} & \dots & \tilde{A}_{r,j} & \dots & \tilde{A}_{r,r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \vdots \\ \tilde{X}_j \\ \vdots \\ \tilde{X}_r \end{bmatrix} \tag{15}$$

여기서 \tilde{X}_j 는 j 전기차에 흐르는 전류인 I_{Lj} 이고, r 은 $r=n+11$ 으로서 표현을 간결하게 하기 위하여 대체한 것이다.

위의 식 (15)를 분해하기 위해 $r \times r$ 차원인 \tilde{A} 행렬에서 j 번째 행과 j 번째 열을 삭제하고 남은 $(r-1) \times (r-1)$ 차원인 행렬을 \tilde{B} 라고 두고 $r \times 1$ 차원인 \tilde{X} 벡터에서 j 번째 성분을 삭제한 $(r-1) \times 1$ 차원인 벡터를 \tilde{X} 라고 하고, \tilde{A} 행렬의 j 번째 열 벡터에서 j 번째 요소인 $\tilde{A}_{j,j}$ 를 제외한 $(r-1) \times 1$ 차원인 벡터를 \tilde{A}_j 라고 두고, 벡터 Y 에서 j 번째 요소인 Y_j 를 제외한 $(r-1) \times 1$ 차원인 벡터를 \tilde{Y} 라고 둔다. 이와 관련된 벡터들을 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\tilde{X} = \begin{bmatrix} \tilde{X}_1 \\ \vdots \\ \tilde{X}_{j-1} \\ \tilde{X}_{j+1} \\ \vdots \\ \tilde{X}_r \end{bmatrix} \tag{16}$$

$$\tilde{A}_j = \begin{bmatrix} \tilde{A}_{1,j} \\ \vdots \\ \tilde{A}_{j-1,j} \\ \tilde{A}_{j+1,j} \\ \vdots \\ \tilde{A}_{r,j} \end{bmatrix} \tag{17}$$

$$\tilde{Y} = \begin{bmatrix} Y_1 \\ \vdots \\ Y_{j-1} \\ Y_{j+1} \\ \vdots \\ Y_r \end{bmatrix} \tag{18}$$

이때 벡터 \tilde{Y} 는 아래와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{Y} &= \tilde{B}\tilde{X} + \tilde{A}_j\tilde{X}_j \\ &= \tilde{B}\tilde{X} + I_{Lj}\tilde{A}_j \end{aligned} \tag{19}$$

위 식에서, $\tilde{X}_j = I_{Lj}$ 이므로 이를 대입한 것이다. 이 식 (19)를 정리하면, 아래의 행렬식이 유도된다.

$$[\tilde{Y} - I_{Lj}\tilde{A}_j] = \tilde{B}\tilde{X} \tag{20}$$

따라서, 해 \tilde{X} 는 아래의 식으로 표현된다.

$$\tilde{X} = \tilde{B}^{-1}[\tilde{Y} - I_{Lj}\tilde{A}_j] \tag{21}$$

j 전기차가 회생제동으로 운전된다면, j 전기차에 흐르는 전류인 I_{Lj} 는 부하전류가 아니라 반대로 전류원인 전원으로 바뀌어지며, 부하일 때의 미지수에서 전원일 때에 주어지는 기지의 입력값으로 바뀌어진다.

위의 식(20)을 사용하여 식 (13)을 풀 때와 동일한 반복계산법으로써 회생제동으로 운전시의 전기철도 시스템의 정태 해석을 할 수 있다. 만일 회생제동으로 운전되는 전기차가 여러 대가 존재한다면 동일한 과정을 반복하여 수행하여 주면 된다. 이 과정은 프로그램으로 자동화 시킬 수 있으므로 본 알고리즘을 활용하는 경우, 원래의 수식만 모델링되면 전기차의 운전 특성이 부하와 전원의 특성으로 수시로 반복하여 변경되거나 또는 동시에 여러 대의 전기차의 특성이 변경된다하더라도 즉시 변경된 조건의 시스템에 대한 해석을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

제안된 새로운 조류계산 기법의 알고리즘을 수행하는 플로우 차트는 그림 3에 제시되어 있다. 먼저 전기차 임피던스 Z_T 를 식 (7)을 사용하여 구한 값과 선로 임피던스 등을 사용하여 폐로 방정식과 단권 변압기 식으로부터 식 (6)의 행렬식을 세우고, 루프 전류를 전기차의 전류로 변환해 주는 변환행렬 M 을 구성하고 이 행렬을 사용하여 루프전류를 전기차의 전류로 변환하여 식 (13)의 새로운 행렬식을 구성한다. 회생제동 전기차가 없으면 이 식과 전기차 임피던스 Z_T 의 식 (7)을 사용하여 반복계산법으로 구하고자 하는 해 \tilde{X} 를 구한다. 수렴 조건으로 반복계산 시의 전압의 크기 변화가 허용오차 ϵ 보다 작을 때 반복계산을 멈추도록 하는 것을 선택한다.

반면에, m 대의 회생제동 전기차가 있다면 회생제동 전기차의 순서대로 각 전기차의 회생전력을 산정하고 이 값으로부터 전기차의 회생전류를 구하고, 식 (20)의 새로운 행렬식을 구성한다. 이 과정을 마지막 m 대의 회생제동 전기차까지 되풀이 하여 최종 행렬식을 구하고, 이 식과 역행하는 부하의 전기차 임피던스 Z_T 의 식 (7)을 사용하여 반복계산법으로 구하고자 하는 해 \tilde{X} 를 구한다. 이를 활용하면, 전기차의 운전 특성이 부하와 전원의 특성으로 수시로 반복하여 변경되거나 또는 동시에 여러 대의 전기차의 특성이 변경된다하더라도 즉시 변경된 조건의 시스템에 대한 해석을 수행할 수 있다는 장점이 있다.

본 연구에서는 제안된 새로운 알고리즘을 구현하는 프로그램을 MATLAB 프로그램으로 개발하였다.

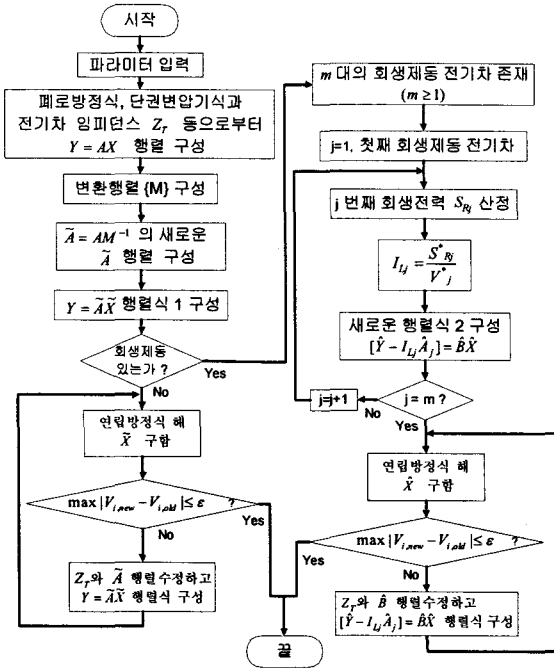


그림 3 새로운 교류 전기철도 시스템의 전력조류계산 알고리즘
 Fig. 3 The algorithm of a new power flow method of AC electric railway system

전기철도 시스템의 전철화 구간에서 운행하는 전기차는 이동과 정지를 반복하는 집중부하이므로 전기적 변화가 매우 심한 특성을 가지고 있다. 이러한 특성으로 전압강하 및 전압변동 등 전기 품질 저하 문제를 야기하며 기기 성능 및 제어와 신호계통에 나쁜 영향을 줄 수 있다. 아래에서는 개발된 프로그램을 활용하여 전압의 변화 특성을 분석하고 전압 제어에 효과적인 STATCOM을 설치하여 전압 강하의 문제를 개선하는 방안에 대하여 분석한다.

4. 시뮬레이션 결과 및 검토

4.1 적용 전기 철도 시스템과 STATCOM 모델

4.1.1 전기 철도 시스템 모델

본 논문에서 적용하는 전기철도 시스템의 모델은 아래의 그림 4의 모델인 것으로 가정하였다. 4대의 단권 변압기가 10km간격으로 설치되어 있고, 그림에 보여져 있는 단권 변압기 사이의 구획에 전기차 3대가 운행되고 있으며, 오른쪽으로 운행되고 있는 케이스에 대하여 분석한다.

적용된 전기철도 시스템의 임피던스는 아래 표 1과 같다. 전기차의 부하는 역행 운전시의 정격 전력으로 전인동력이 4,000 kW, 역률 99% 이고, 보조전력이 350 kW, 역률 80% 인 것으로 정하였다.

전기차의 역행 운전시의 전력은 정토크 영역, 정전력 영역, 특성영역을 가지며, 근사적으로 양쪽으로 경사진 사다리꼴의 모형으로 나타난다. 전압의 문제는 전기차의 기동시의 정토크영역과 정전력 영역에서 발생되므로, 전기차의 기동시의 가속도 제한 기준 이하에서 정속도에 이를 때까지 지속적으로 일정하게 가속하는 정토크의 영역과 이 후에 일정한 전력으로 운전하는 정전력 영역을 고려하여 아래 그림 5의 모양으로 운전된다고 가정하고 이 경우에 대하여 분석한다.

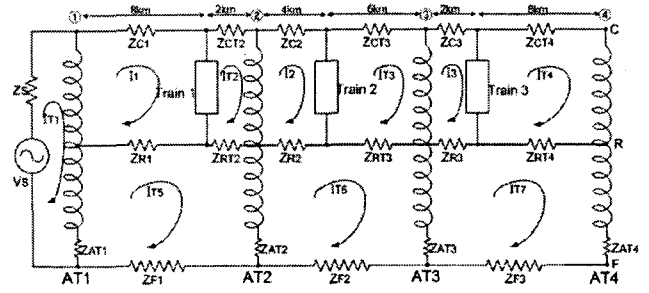


그림 4 적용된 전기철도 시스템의 회로 모델
 Fig. 4 The circuit model of AC electric railway system for case study

표 1 전기철도 시스템의 임피던스

Table 1 Impedances of AC electric railway system

임피던스 종류	크기 (단위)
전차선의 자기 임피던스 (Z_C)	0.19+j0.73[Ω/km]
급전선의 자기 임피던스 (Z_{CF})	0.12+j0.59[Ω/km]
레일의 자기 임피던스 (Z_R)	0.099+j0.47[Ω/km]
전차선-급전선의 상호임피던스(Z_{CF})	0.051+j0.36[Ω/km]
전차선-레일의 상호 임피던스 (Z_{CR})	0.058+j0.373[Ω/km]
급전선-레일의 상호 임피던스 (Z_{FR})	0.058+j0.369[Ω/km]
전원 측 임피던스 (Z_S)	0.385+j1.728[Ω]
AT 변압기의 자기 임피던스 (Z_{AT})	0.029+j0.449[Ω]

전기차가 회생 운전시의 회생전력은 전동기의 회생 에너지에 의하여 결정되는데, 제동력과 전기차의 중량, 전기차의 속도, 전동기 효율 등에 비례하여 변하게 된다. 회생전력은 차량 운행결과의 데이터로부터 역행전력의 약 40%-60% 사이의 값인 것으로 나타나고 있으므로, 회생전력을 근사적으로 역행시의 정격 전력의 50%인 것으로 가정하였다. 회생전력은 계단 함수 형의 정전력으로 작용한다고 가정한다.

전철 주변압기에서 전원 측으로 본 등가전원의 동적 모델링은 대표적인 발전기 동적 모델인 IEEE Type I 여자기 모델을 가지고 있는 발전기 2축 모델이 사용된다[9].

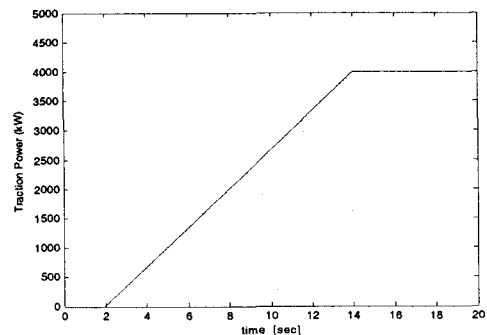


그림 5 기동 시의 견인 전력 모형
 Fig. 5 Traction power model at starting

4.1.2 STATCOM 모델

동일한 송전선로 확보공간을 보다 효율적으로 사용하여 전력전송과 계통안정화를 극대화하기 위한 노력의 일환으로 전력용반도체 스위칭 소자 개발의 진전을 바탕으로 한 전압, 유·무효전력을 연속, 고속으로 효율적으로 제어하는 FACTS(Flexible AC Transmission System) 기기들에 대한 연구가 선진국을 중심으로 국내외에서 활발히 연구 중에 있고 실제통에 적용되고 있으며, 그 중에서 대표적인 기기로 STATCOM(Static Synchronous Compensator)을 들 수 있다. STATCOM은 스위칭 회로에 재래식 싸이리스터 대신에 GTO(Gate Turn Off) 싸이리스터를 사용한다. STATCOM은 전압원 인버터와 에너지 저장용 직류 커패시터 그리고 제어회로로 구성되어있으며, 출력전압은 교류계통 전압과 위상이 일치하도록 연속적으로 제어 된다. 등가적으로는 크기와 위상을 신속하게 조절할 수 있는 전압을 변압기의 누설 리액턴스를 통하여 계통에 인가하는 장치로 볼 수 있다. STATCOM은 전상 무효전력에서 지상 무효전력까지 무효전력의 세밀한 연속 제어가 가능하고, 응답특성이 빨라 계통의 신속한 전압 개선과 함께 과도 안정도 향상에도 기여할 수 있다.

본 논문에서 STATCOM의 동적 시뮬레이션을 위한 모델링은 PI 제어기가 추가된 그림 6의 PSS/E 모델을 채택하였다. 정적 모델링은 STATCOM의 주어진 전류 출력에 해당하는 정적 무효전력 보상장치로 모델링 하였다.

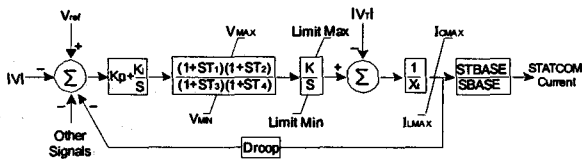


그림 6 PI 제어기가 추가된 STATCOM의 모델
Fig. 6 A STATCOM model with a PI controller

4.2 시뮬레이션 결과 검토

4.2.1 전기차 2의 기동시의 전압 특성 분석

그림 4에 보여져 있는 전기철도 시스템에서 전기차 1과 3은 정격 용량으로 운전되고 있고 전기차2가 정지 했다가 기동하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한다. 전기차 2가 2초의 시간까지 정지해 있다가 2초의 시간에 출발하여 그림 5의 기동 시의 견인 전력 모형과 같이 14초까지 정도오크 운전을 하고 그 후에 정전력 운전으로 기동하는 경우를 가정한다. 이 때의 전기차 2와 AT 변압기2와 3의 전압의 변화를 시뮬레이션한 결과가 그림 7 -그림 9에 각각 보여져 있다. 전기차 2의 전압이 정전력으로 운전시에 전압이 상당히 떨어지고, 전압의 변화 폭도 제법 크다는 것을 알 수 있다. AT 변압기2와 3의 전압의 변화도 전기차 2의 전압과 유형은 유사하나 정전력 운전 시에 전기차 2의 전압보다는 약간 높고, 전원측에 가까운 AT 변압기2의 전압이 더 높다는 것을 알 수 있다.

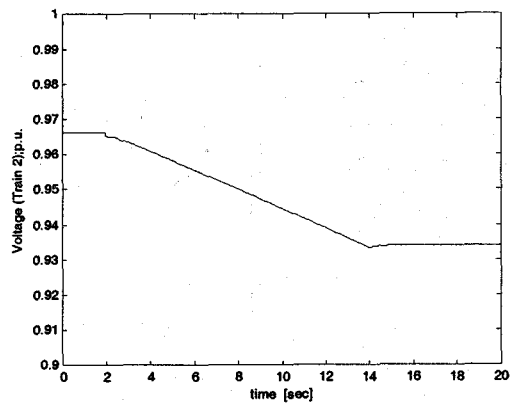


그림 7 전기차 2의 전압의 변화 (전기차 2의 기동 시)
Fig. 7 Voltage variation of electric train 2 (at starting of electric train 2)

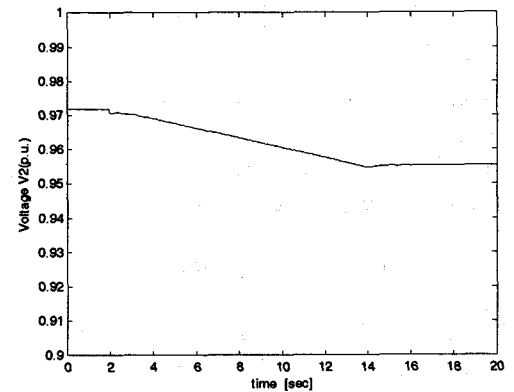


그림 8 AT 변압기 2의 전압의 변화 (전기차 2의 기동 시)
Fig. 8 Voltage variation of AT 2 (at starting of electric train 2)

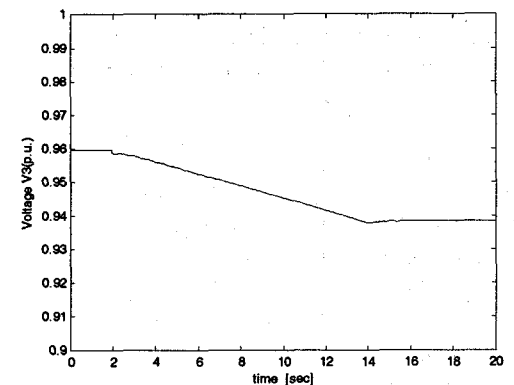


그림 9 AT 변압기 3의 전압의 변화 (전기차 2의 기동 시)
Fig. 9 Voltage variation of AT 3(at starting of electric train 2)

4.2.2 전기차 2의 회생 제동시의 전압 특성 분석

회생제동의 케이스를 분석하기 위하여 그림 4에 보여져 있는 전기철도 시스템에서 전기차 1과 2는 정격 용량으로 운전되고 있고 전기차 3이 타행운전하다가 회생제동하는 경우에 대하여 시뮬레이션을 수행한다. 타행운전 시에는 견인 전력을 사용하지

않고 전기차의 달리는 관성으로 운전하는 경우이므로 전인전력 소모는 영이다. 전기차 2가 2 초의 시간까지 타행운전하고 있다가 2초의 시간에 회생제동하는 경우를 가정한다. 이때의 전기차 2와 AT 변압기 2의 전압의 변화를 시뮬레이션한 결과가 그림 10과 그림 11에 각각 보여져 있다. 전기차 2의 전압은 전기차 2의 회생 제동으로 전기차 2가 발전 작용을 하므로 전압이 상당한 폭으로 상승함을 알 수 있다. 회생제동차량의 최대허용전압은 일반적으로 시스템 전압의 120%이며, 이를 초과하면 초과하는 양만큼은 저항기로 소모시켜 더 이상 전압이 올라가지 못하게 제어한다. 이 경우는 시스템 전압의 120%를 초과하지는 않으므로 저항기로 소모시키는 것은 고려하지 않는다. AT 변압기 2의 전압은 전기차 2가 회생 제동을 하지 않을 때는 전기차 2의 전압보다 높으나 전기차 2가 회생 제동을 할 때는 전기차 2의 전압보다 낮다는 것을 알 수 있다.

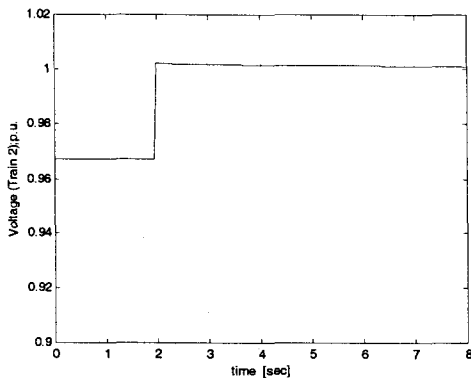


그림 10 전기차 2의 전압의 변화 (전기차 2의 회생 제동 시)
 Fig. 10 Voltage variation of electric train 2 (at regenerative braking of electric train 2)

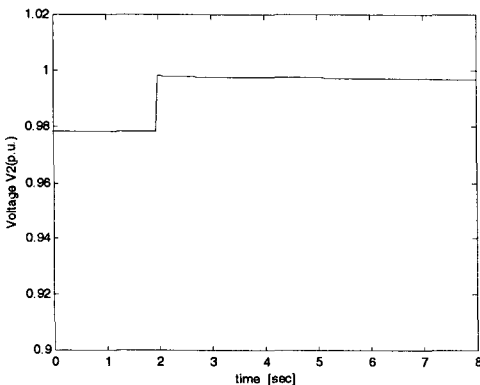


그림 11 AT 변압기 2의 전압의 변화(전기차 2의 회생 제동 시)
 Fig. 11 Voltage variation of AT 2 (at regenerative braking of electric train 2)

4.2.3 STATCOM 설치 시에 전기차 2의 기동시의 전압 특성 분석

STATCOM이 전압 제어에 미치는 효과를 분석하기 위하여 그림 4에 보여져 있는 전기철도 시스템에서 AT 변압기 3이 설치된 지역에 STATCOM이 설치되어 있다고 가정한다. 다른 조건들은 위의 4.2.1.의 경우와 동일하게 전기차 1과 3은 정격 용량으로 운전되고 있고 전기차2가 정지 했다가 기동하는 경우에 대하여

시뮬레이션을 수행한다. STATCOM의 무효전력량은 그림 12에 보여져 있다. 전기차가 기동운전시에 떨어지는 전압을 보상하기 위하여 유사한 모형으로 용량성 무효전력인 무효전력 공급량이 증가함을 보여준다. 이 때의 전기차 2와 AT 3의 전압의 변화를 시뮬레이션한 결과가 그림 13 -그림 14에 각각 보여져 있다. 이 경우 전기차 2의 전압이 앞의 그림 7과 비교해 보면 정지 시에는 물론이고 정전력으로 운전 시에도 시스템 전압에 근접해 있어서 전압강하 문제를 크게 개선시키게 됨을 알 수 있다. AT 변압기 3의 전압은 STATCOM이 설치된 지역이므로 시스템 전압 근처의 전압으로 유지되고 있음을 알 수 있다.

이러한 시뮬레이션을 통하여 본 논문에서 제안된 새로운 교류 전기 철도 시스템의 전력 조류 계산 기법이 각 전기차마다 부하와 전원의 역할을 수시로 반복하게 되는 교류 전기 철도 시스템의 해석에 아주 효과적으로 적용될 수 있음을 보여준다.

그리고, 전기차는 이동과 정지를 반복하는 집중부하로서 전기적 특성이 수시로 변하는 특징을 가지고 있어서, 교류 전기 철도 시스템은 급격한 전압강하 및 전압변동 등의 문제를 가지고 있으므로 STATCOM 과 같은 무효전력 보상 장치를 설치하여 이를 개선시키는 방안이 보다 깊이 검토될 필요가 있다.

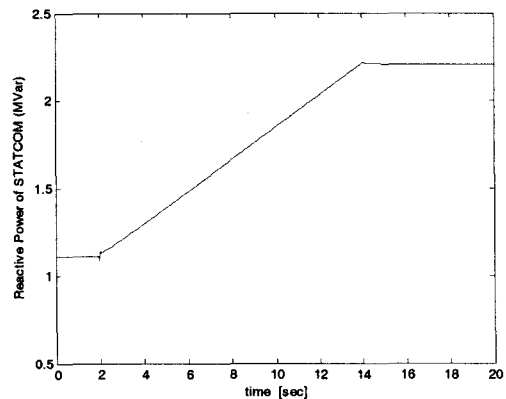


그림 12 STATCOM의 무효전력 공급량 (전기차 2의 기동 시)
 Fig. 12 Reactive power supply of STATCOM (at starting of electric train 2)

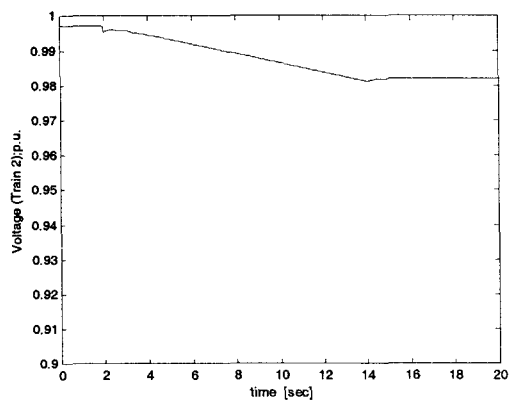


그림 13 STATCOM 설치 시의 전기차 2의 전압의 변화 (전기차 2의 기동 시)
 Fig. 13 Voltage variation of electric train 2 in case of installing a STATCOM (at starting of electric train 2)

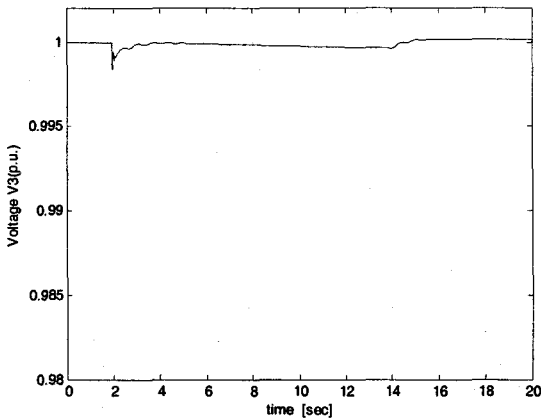


그림 14 STATCOM 설치 시의 AT 변압기 3의 전압의 변화 (전기차 2의 기동 시)

Fig. 14 Voltage variation of AT 3 in case of installing a STATCOM (at starting of electric train 2)

5. 결 론

교류 전기 철도 시스템은 그것의 주된 부하인 전기차가 이동과 정지를 반복하는 집중부하로서 전기적 특성이 수시로 변하는 특징을 가지고 있어서 급격한 전압강하 및 전압변동을 겪게 된다. 또한 회생제동차량의 등장으로 회생제동 시에는 부하의 역할에서 전원의 역할로 변하게 되고, 각 차량 부하마다 부하와 전원의 역할을 수시로 반복하게 된다. 본 논문에서는 회생제동 시에 부하의 역할에서 전원의 역할로 변하게 되고 각 차량 부하마다 부하와 전원의 역할을 수시로 반복하게 되는 이러한 점을 효과적으로 해결하는 새로운 교류 전기 철도 시스템의 전력 조류 계산 기법을 제안한다.

그리고, 급격한 전기차의 부하변동으로 인한 전압 강하와 전압 동요 현상이 발생하고 있으므로 이 기법을 하나의 전형적인 교류 전기 철도 시스템에 적용하여 전기차가 기동 시의 전압 변동에 대하여 분석한다. 또, 전압 제어에 효과적인 STATCOM을 설치하여 전압 강하의 문제를 개선하는 방안에 대하여 분석한다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통하여 제안된 교류 전기 철도 시스템의 전력 조류 계산 기법이 효과적으로 잘 적용될 수 있음을 보여준다.

감사의 글

이 논문은 인천대학교 2005년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참 고 문 헌

[1] R.J. Hill, I.H. Cevik, "On-line simulation of voltage regulation in autotransformer-fed AC electric railroad traction networks", IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 3, , pp.365-372, Aug. 1993.
 [2] S. Funabiki, H. Nakano, T. Tanaka, " A fuzzy-based

control strategy for leveling electric power fluctuations in railroad substations ", Proceedings of IEEE International Conference on Power Electronics and Drive Systems, Vol. 2, pp.796-800, 22-25 Oct. 2001.

[3] 윤재영, 최홍관, 김종률, "전철 급전계통의 EMTDC 모델개발", 대한전기학회 논문지, 제 51A권, 제 12호, pp.624-629, 2002.
 [4] 이한민, 오광해, 장길수, 권세혁, "EMTDC에 의한 교류 전철급전시스템 사고 해석", 대한전기학회 논문지, 제 52A권, 제 9호, pp.521-527, 2003.
 [5] 창상훈, 김주락, 홍재승, 오광해, 김정훈, "전기철도 교류급전 시스템의 회로 모델링 및 해석기법 연구", 한국철도학회논문집, 제 3권, 제 4호, pp.219-228, 2000.
 [6] 이준경, 오재경, 김진오, "STATCOM을 이용한 고속전철 부하가 연계된 계통의 안정도 향상에 관한 연구", 대한전기학회 논문지, 제 52A권, 제 11호, pp.625-631, 2003.
 [7] 정상기, 이승재, "회생차량을 포함한 급전시스템 해석 알고리즘", 대한전기학회 논문지, 제 52A권, 제 11호, pp.639-646, 2003.
 [8] 한국철도기술연구원, 철도급전시스템 체계화 구축 기술 개발사업, 2000년.
 [9] P.M.Anderson and A.A.Fouad, Power System Control and Stability, Ames, IA, The Iowa State University Press, 1977

저 자 소 개



이 병 하 (李丙河)

1954년 7월 12일생. 1978년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1991년 The Pennsylvania State Univ. 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년~1994년 한전 기술연구원 선임연구원. 1994년~현재 인천대학교 전기공학과 교수.

Tel : 032-770-8437

E-mail : bhlee@incheon.ac.kr



백 정 명 (白正明)

1980년 5월 5일생. 2007년 인천대학교 전기공학과 졸업. 현재 동대학원 석사과정.

Tel : 032-770-4325

E-mail : baekguy96@nate.com