

연료전지 시스템을 이용한 전기철도 급전계통 전압강하 보상

The Voltage Drop Compensation of Electric Railway Feeding system using a Fuelcell System

김 재 문*
(Jae-Moon Kim)

Abstract - In this paper, fuel cell power generation system that is being studied in recent railway field was applied to compensate for the voltage drop due to the load as driving electric vehicle. PSIM simulation program is to be used to implement the modeling of the electric railway for AC AT feeder system. For it, It was applied to the product-type single-phase PLL algorithm, step-down converter is controlled as power so as to have the fuelcell generation system.

Based on it's result, a reactive power due to the catenary impedance in accordance with the current flowing is compensated as linked with fuelcell generation system which supplied the current to the power supply grid, and then its performance was confirmed that voltage compensation effect obtained at SubStation (SS), SubSectioning Post (SSP), Sectioning Post (SP)

Key Words : Fuel cell power generation system, Voltage drop, AT feeder system, PLL algorithm, Reactive power

1. 서 론

국내 철도산업은 교통수요 변화에 대비하여 전철화가 지속적으로 이루어지고 있으며, 보다 고급화된 철도 교통수단에 대한 요구가 증대하고 있다. 이와 더불어 전기에너지에 대한 의존도가 철도산업분야에서 점진적으로 상승하고 있다. 따라서 전기철도 차량에 인가하는 전력에 대한 안정적 공급과 전력 품질 향상에 대한 요구가 급증하고 있는 추세이다[1].

교류 전기철도 급전시스템에서 전력품질은 고조파 왜곡, 무효 전력 발생, 단상 부하 불평형과 같은 문제가 존재하여 품질저하를 초래하고 있다. 이것은 전기철도가 갖고 있는 고유특성으로 전차선로를 주행하는 전기차량의 비선형 특성은 차량 주행에 따른 임피던스 증가로 많은 양의 무효전력을 발생시킨다. 또한 가속에 따른 과도상태의 돌입전류가 부하인 전기차량으로 유입되어 전압 불평형을 야기시킨다. 따라서 전기철도분야에서는 수동 전력 필터를 비롯하여 전력전자 기술을 응용한 능동전력 보상장치까지 다양한 연구가 이루어져 왔다. 일례로 전차선 전압강하를 보상하기 위해 TSC (Thyristor-Switched Capacitor) 방식 SVC (Static Var Compensator), PWM 인버터를 적용한 STATCOM (Static Synchronous Compensator) 등 무효전력 보상을 통한 전차선 전압강하, 입력역률의 저하, 부하 불평형, 고조파 전류 왜곡

에 대한 연구가 지속적으로 이루어지고 있다[2-3].

한편 최근 철도분야에 신재생 에너지 활용 등에 따른 적용 가능성에 대한 연구가 진행되고 있다. 태양광을 이용한 역사내 에너지 절감, 연료전지를 이용한 철도차량 구동에 대한 선행연구[4] 등이 그 일례이다.

본 논문에서는 국내에서 적용되고 있는 교류 AT급전계통 시스템에 대한 모델링을 통해 부하인 전기차량에 전류가 유입됨으로써 이에 따른 급전계통의 전압강하를 보상하기 위해 신재생 에너지인 연료전지 시스템을 급전계통에 연계하였을 경우에 대한 선행연구를 수행하였다. 이를 위해 시뮬레이션 프로그램으로 PSIM을 사용하였으며, 시뮬레이션 분석을 통해 양호한 결과를 얻었다.

2. 본 론

2.1 교류 AT급전계통

국내 교류 급전계통에 적용되고 있는 급전회로는 그림 1과 같이 구성되며, 한전으로부터 수전된 3상 154[kV] 전력을 단상 55[kV] 전력으로 변환하는 전원계통은 급전회로에 설치된 단권 변압기를 거쳐 급전선, 전차선을 통해 전기차량에 전력을 공급한다[5].

급전용 전철변전소 (SubStation, 이하 SS)는 전력을 공급해주는 수전설비, 급전회로에 전압을 공급하기 위한 스코트 변압기로 구성된 변전설비, 양질의 전력을 공급하기 위해 인덕턴스에 의한 전압강하를 보상해주는 콘덴서 설비, 스코트(Scott)변압기 2차 측에서 급전회로에 공급하기 위하여 구성된 전차선로 설비 등으로 구성된다. 그리고 작업 또는 사고시 단전구간을 한정하거나 연장

* Corresponding Author : Dept. of Transportation System Engineering, Graduate School of Transportation, Korea National University of Transportation, Korea

E-mail: goldmoon@ut.ac.kr

Received : January 14, 2015; Accepted : January 26, 2015

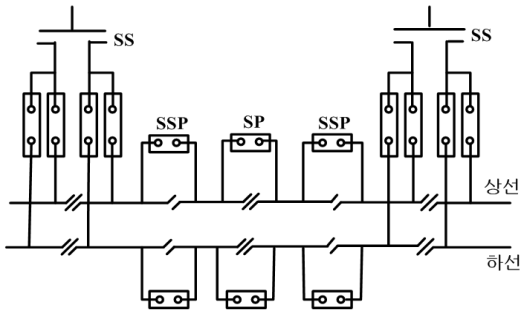


그림 1 일반적인 교류 급전회로 구성도
Fig. 1 Configuration Diagram of AC Feeder circuit

급전을 위한 목적으로 보조 급전구분소 (SubSectioning Post, 이하 SSP), 급전구간의 구분과 연장을 위하여 개폐장치를 설치한 급전구분소 (Sectioning Post, 이하 SP) 등을 설치 운영하고 있다.

그림 2는 AT 급전방식의 교류 전기철도 구성도를 보여준다. 스코트 변압기는 전철변전소에 설치되어 한전 전원 3상을 2상인 M상과 T상으로 변환하는 역할을 한다. 그리고 전차선과 급전선에 단권변압기 (Auto Transformer, 이하 AT)가 설치되어 변압기 중성점은 레일에 연결이 되고 양단은 전차선과 급전선에 각각 연결되는 급전회로 방식이다. 단권변압기(AT)는 스코트 변압기 2차 축을 기준으로 전차선과 급전선 사이에 55[kV]를 인가하게 되며, 중성점이 전차선과 레일 사이에 연결되어 있어 27.5[kV] 전압을 인가한다. 따라서 전차선은 레일보다 전위가 높으며, 가공선로인 급전선은 레일 및 대지보다 전위가 낮게 된다[6].

급전계통에 교류 전원을 공급하는 AT급전 방식은 그림 2에서 보듯이 급전 전압이 전기차량에 인가하는 전압의 2배이므로 직류 급전 등 타 급전방식에 비해 전철변전소 이격 거리가 길어지며 급전선 전압은 중성점이 접지되어 절연 레벨은 절반이 된다. 또한 이상적인 경우 AT 변압기의 특성상 전류는 전차선과 레일 사이의 AT 권선을 통해 변압기로 귀환하는 두 종류로 나뉜다. 즉, AT가 1:1의 비율을 갖기 때문에 공급되는 전류의 절반은 AT섹션과 차량사이에서 순환하는 전류이고, 나머지 절반은 전철변전소로 귀환하는 전류로 각각 흐르게 된다.

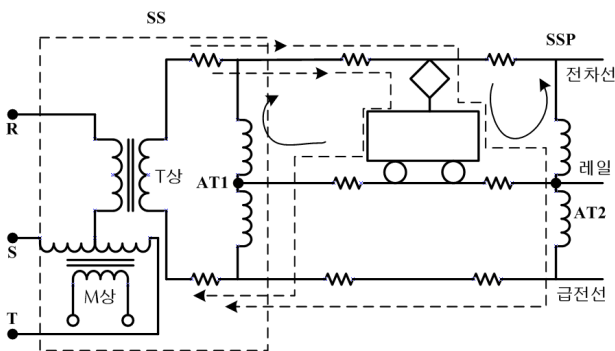


그림 2 AT 급전방식의 교류 전기철도
Fig. 2 AC Electric Railway of AT Feeder method

연료전지 시스템을 이용한 전기철도 급전계통 전압강하 보상

2.2 연료전지 발전 시스템

연료전지는 양극 (Anode)을 통해 수소가 공급되고, 음극 (Cathode)을 통하여 공기 중의 산소가 공급이 된다. 음극을 통하여 들어온 분자는 촉매에 의하여 양자와 전자로 나누어지고 나누어진 양자와 전자는 서로 다른 경로를 통하여 양극에 도달하게 된다. 양자는 전해질을 통하여 흘러가고 전자는 외부 회로를 통하여 전류를 흐르게 하면 산소와 결합하여 물을 발생시킨다.

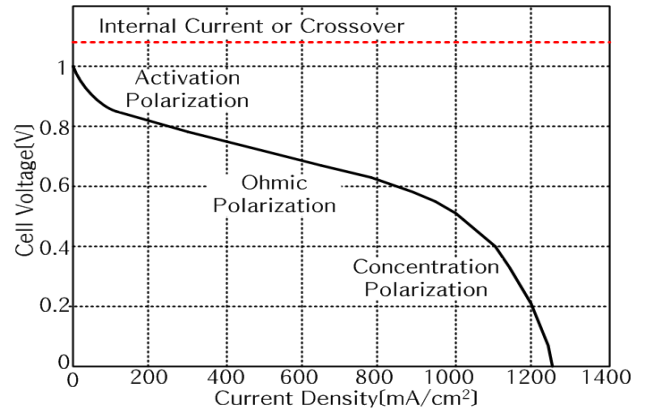


그림 3 연료전지의 전압-전류 특성곡선
Fig. 3 Characteristic Curve of V-I of Fuel cell

그림 3은 연료전지의 전압-전류 특성곡선을 보여준다. 연료전지 단위 셀의 전압은 무부하시 약 1.2~1.3V이고 전류가 증가함에 따라 약 0.6~0.7V까지 낮아진다. 연료전지의 전압과 전류의 특성은 크게 활성화 분극 (Activation Polarization), 저항 분극 (Ohmic Polarization), 농도 분극 (Concentration Polarization)으로 나뉜다. 특히 저항 분극은 연료전지의 주 동작영역으로 부하가 증가함에 따라 연료전지의 내부저항 및 연료의 공급량이 일정치 않아 연료전지 출력이 선형적으로 감소한다.

비표준 상태에서 연료전지의 이론적 전압으로 “네른스트 전압”이 존재하며 네른스트 전압에서 각 분극의 전압을 뺀 전압인 “단위 셀 전압”은 식 (1)과 같이 표현되며, 셀의 직렬 연결 수를 곱하면 스택 전압이 된다.

$$V_{cell} = E - (i + i_n)r - \frac{RT}{\alpha nF} \ln\left(\frac{i + i_n}{i_o}\right) + \frac{RT}{nF} \ln\left(1 - \frac{i + i_n}{i_L}\right) \quad (1)$$

여기서, i_n 은 내부전류, R은 가스상수 (8.3144 J/mokK), T는 절대온도 (K), α 는 전이계수, n은 반응에 참여한 몰(mol) 수, F는 페라데이 상수(96,485 C/mol), i_o 는 교환전류밀도, i_L 은 제한전류밀도를 나타낸다.

한편 철도분야에서는 연료전지 발전시스템을 탑재한 철도차량에 대한 연구가 진행되고 있다. 그림 4는 연료전지 시스템을 탑재한 철도차량이 주행 및 제동에 따른 전력을 공급하기 위한 도플로지를 보여준다. 그림 5와 같이 연료전지 시스템을 통해 생성된 전력은 전력변환장치를 이용하여 견인전동기를 구동하게 되

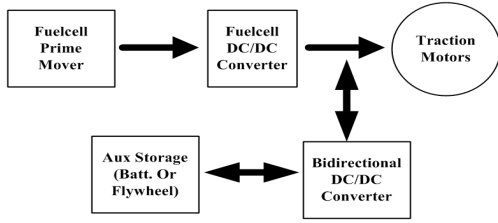


그림 4 연료전지 하이브리드 전기기관차 토폴로지
Fig. 4 Fuelcell Hybrid Locomotive Topology

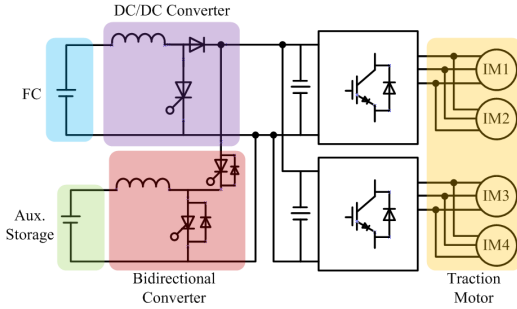


그림 5 JR 수소연료전지 전동차 일례
Fig. 5 The example of Fuelcell EMU for JR

며, 가속시 부족한 전력을 보조 에너지장치를 통해 공급받거나 제동시의 회생에너지를 양방향 컨버터를 통해 저장하게 된다[4].

2.3 PLL 알고리즘을 적용한 전압강하 보상

교류 AT급전계통에 전기에너지를 동력원으로 하는 전기차량이 주행하게 되면 부하인 전기차량 이동에 따른 전류량의 변화로 전철변전소를 기준으로 전압강하가 발생하게 된다. 따라서 신재생 에너지인 연료전지 발전시스템을 전철변전소에서 멀리 떨어진 급전구분소(SP)에 설치함으로써 전압강하를 보상하고자 한다. 급전계통으로 효율적으로 에너지를 전달하기 위해 전력변환장치를 통해 전차선과 레일사이에 연결되어진다. 여기서 원하는 유효 및 무효전력을 전송하기 위해 전압의 위상을 정확하게 검출하는 것이 계통에 연결된 인버터의 제어 성능에 영향을 준다. 급전계통과 동기화시키기 위해 PLL(Phase Lock Loop) 기법을 기반으로 계통 전압벡터의 위상각을 측정하게 된다.

그림 6은 철도급전계통과 연료전지발전시스템의 전압 동기화를 위하여 간단하면서도 위상제어가 가능한 곱형 단상 PLL의 구조를 보여준다. 곱형 위상검출기에 저역필터를 사용했으며 기준전압인 급전계통 전압과 궤환신호를 곱하는 위상 검출기(Phase Detector, PD), 저주파 필터(LPF), 증폭기 및 적분기로 구성되어 있다[7].

급전계통 전압은 $V_g = V_p \cos(\omega_1 t + \theta_g)$ 로 표현하고 궤환신호 $V_f = \sin(\omega_2 t + \theta_s)$ 로 하면, 급전계통 전압과 궤환신호의 곱인 PD의 출력 V_e 는 다음과 같다.

$$V_e = V_g \cdot V_f = V_p \cos(\omega_1 t + \theta_g) \sin(\omega_2 t + \theta_s) \quad (2)$$

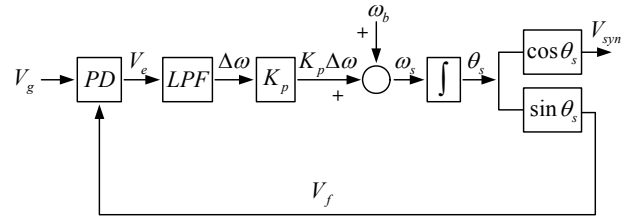


그림 6 곱형 단상 PLL의 구조
Fig. 6 Structure of Product-type Single Phase PLL

여기서, V_p 는 급전계통 전압의 최대값, ω_1 와 θ_g 는 급전계통 전압의 각주파수 및 위상, ω_2 와 θ_s 는 궤환신호의 각주파수 및 위상이다.

PLL이 급전계통 전압의 기본 주파수로 lock될 때 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_b (120\pi)$ 이 된다. 따라서 위상검출기(PD)의 출력값을 단위화 시키기 위하여 급전계통 전압의 최대값 $V_p = 2$ 할 경우, PD의 출력인 식 (2)는 식 (3)과 같이 된다.

$$V_e = \sin(\theta_g - \theta_s) + \sin(2\omega_{bt} + \theta_g + \theta_s) \quad (3)$$

식 (3)에서 PD의 출력은 직류성분과 기본주파수의 두 배 주파수로 발전하는 교류성분으로 구성된다. 여기서 저주파 필터(LPF)에 의해 교류성분이 거의 제거되고 두 위상각 차가 작다고 가정하면, 식 (4)과 같이 두 위상차로 근사화 시킬 수 있다.

$$V_e \approx \theta_g - \theta_s \quad (4)$$

PD출력 중 교류성분을 감쇄시키기 위하여 식 (5)와 같은 1차 저주파 필터를 사용하고, 그 출력을 주파수 변화량 $\Delta\omega$ 로 정의한다.

$$\frac{\Delta\omega}{V_e} = \frac{1}{1 + S\tau} \quad (5)$$

여기서 $\tau = 1/\omega_c = 1/(2\pi f_c)$ 이며, f_c 는 차단주파수이다.

다음은 증폭기의 증폭율 K_p 를 곱한 후, 60Hz 주파수의 기본 각속도를 더하여 ω_s 를 계산한다. 이 각속도를 적분하여 위상각 θ_s 를 구하고 정현파와 여현파 함수로 급전계통 전압과 동기화시킨 동기신호 V_{syn} 과 궤환신호 V_f 를 각각 계산한다. 이 방식은 기본 각속도를 중심으로 변화량을 조정하여 PLL의 두 입력신호 위상을 조정하게 된다.

2.4 시뮬레이션

본 논문에서는 그림 7과 같이 교류 AT급전시스템에서 부하인 전기차량이 전철변전소에서 멀리 떨어진 급전구분소 근처에 존재할 때 전압강하가 발생하게 되며 이에 대한 전압보상을 위해 보조 급전구분소(SSP)와 급전구분소(SP) 사이에 연료전지 발전시

시스템을 탑재한 이동용 철도차량이 전압보상을 하는 시뮬레이션을 수행하였다.

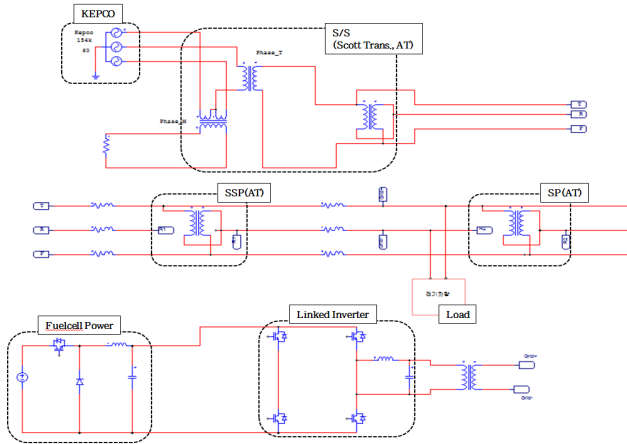


그림 7 시뮬레이션 급전계통 회로
Fig. 7 Feeder diagram configuration for Simulation

그림 7에 대한 시뮬레이션을 수행하기 위해 적용한 주요 파라미터는 표 1과 같다[8].

표 1 시뮬레이션에 적용된 파라미터 값

Table 1 The Parameter value used simulation

변수	데이터
한전계통(Kepeco)	154 [kV]
전차선-급전선 전압	55 [kV]
전차선-레일 전압	27.5 [kV]
전차선 임피던스	0.063 [Ω /km] 1.04 [[mH/km]
급전선 임피던스	0.102 [Ω /km] 0.77 [[mH/km]
레일 임피던스	0.157 [Ω /km] 1.38 [[mH/km]
연료전지발전시스템 용량	1[MW]
차량 부하	30[Ω], 10[mH]

2.4.1 모델링

가. 전원측 및 전철변전소 모델링

그림 8과 같이 전원측은 한전으로부터 수전받은 154[kV] 전압을 전철변전소에 설치된 스코트 변압기 및 단권변압기(AT)를 모델링하였다. 스코트 변압기는 3상회로의 전원에 평형부하가 걸리도록 단상 변압기 2대를 사용하여 3상→2상 변환하는 스코트 결선방식이 주로 사용된다. 단권변압기는 M상 혹은 T상에 인가되어 있는 55[kV] 전압을 레일을 중심으로 전차선, 급전선에 공급되도록 한다[9].

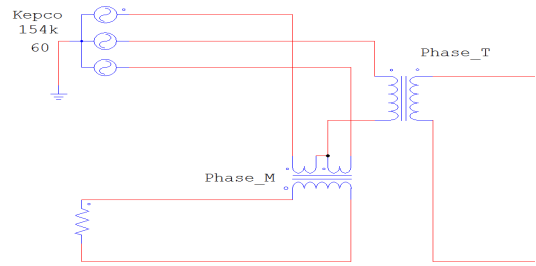


그림 8 전원측 및 스코트 변압기 모델링
Fig. 8 Power source and scott transformer modeling

나. 단권변압기 (AT) 모델링

단권변압기 (AT)는 공통 철심을 이용하여 코일 2개를 감고 이를 직렬로 접속해서 1차와 2차의 단자를 인출하여 2권선 변압기와 동일한 변성비를 얻는다[10].

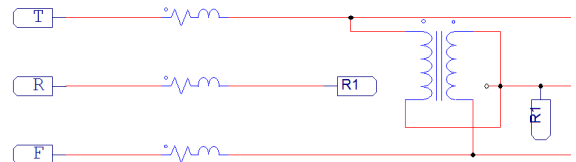


그림 9 단권변압기 모델링
Fig. 9 Auto Transformer modeling

보조 급전구분소 (SSP)와 급전구분소 (SP) 등 전차선로에 사용되는 단권변압기는 1차측 권수가 2차측의 2배가 된다. 따라서 1차 측의 전압은 55[kV]이고 2차측 전압은 27.5[kV]가 되며 두 권선을 접속하는 지점에 전차선로의 레일과 연결한다. 그림 9는 단권변압기(AT) 모델링을 보여준다.

다. 연료전지 발전시스템 모델링

연료전지의 특성곡선은 그림 3과 같으며, 활성화 분극과 농도 분극은 비선형영역으로 모델링이 어려우므로 비교적 선형의 특성을 보이는 저항분극에서 동작하도록 모델링을 수행하였다. 저항 분극인 경우 전류가 증가함에 따라 전압이 감소하는 특성을 보인다. 따라서 연료전지 발전시스템의 모델링은 강압형 컨버터로 구현하였으며, 부하변화에 따른 전압과 전류가 반비례하도록 전력 제어를 통해 시뮬레이션을 수행하였다.

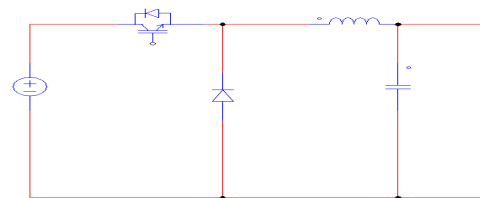


그림 10 연료전지 발전시스템 모델링
Fig. 10 Fuelcell generation system modeling

라. 전차선로 및 철도차량 모델링

전차선로는 단권변압기를 거쳐 전차선(T), 레일(R), 급전선(F)으로 나뉘며 철도차량은 전차선(T)과 레일(R) 사이에 존재한다. 철도차량은 인덕터의 성분이 큰 전류형 부하이므로 본 논문에서는 R-L부하로 모델링을 수행하였다.

2.4.2 모델링에 따른 시뮬레이션 결과

한전계통에서 154[kV]를 수신받아 스코트 변압기를 통해 M상과 T상으로 2상 변환하게 되면 그림 11과 같이 전차선과 급전선 사이에 90° 위상차를 갖는 55[kV] 전압이 인가된다. 그리고 그림 9의 모델링을 통해 전철변전소의 AT변압기를 거치면 전차선(T), 급전선(F), 레일(R)로 나뉘며 전차선과 레일의 전압은 그림 12와 같이 27.5[kV]가 된다.

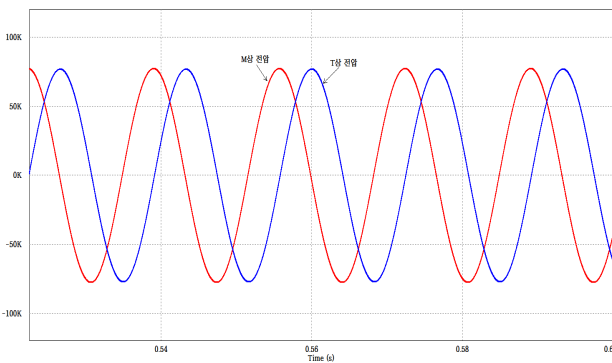


그림 11 M상과 T상 전압 (무부하)
Fig. 11 M phase and T phase voltage (No load)

그림 13은 그림 10에 대한 모델링에 대한 결과 파형으로 연료전지 발전특성을 갖도록 강압형 컨버터를 통해 전력제어를 하였다. 1[MW] 전력용량을 출력하도록 전력제어를 하게 되면 그림 13에서 보듯이 기준전력에 대해 실제전력이 추종하고 있으며, 이때 전류는 약 1,400[A]가 흐르고 부하에 인가되는 전압은 약 700[V]가 되고 있음을 보여준다.

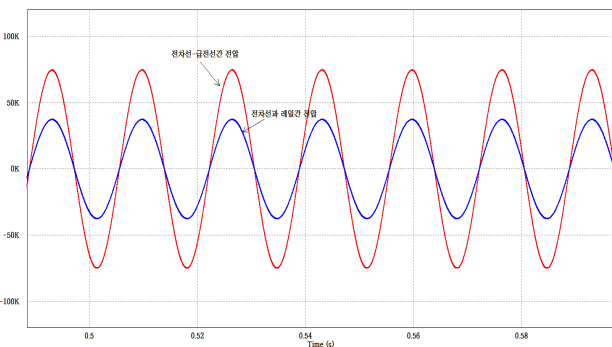


그림 12 전차선과 급전선, 전차선과 레일간 전압 (무부하)
Fig. 12 Voltage of Contact wire-Feeder, Contact wire-Rail

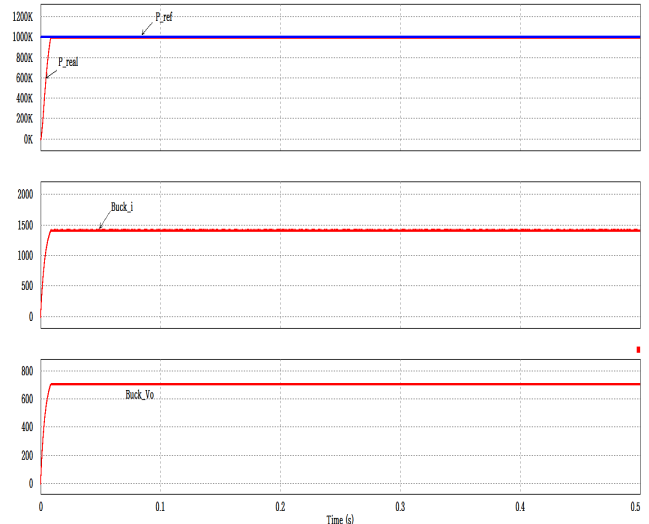
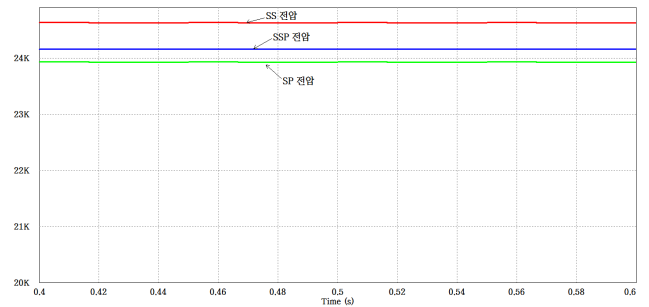
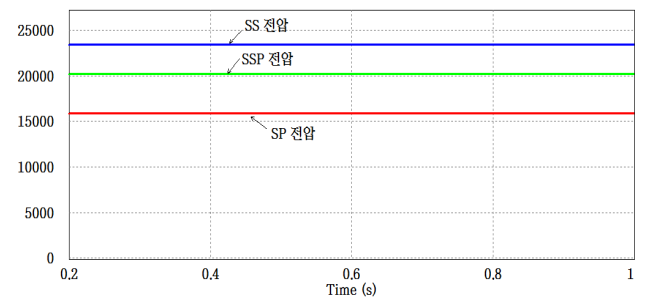


그림 13 연료전지 특성을 갖는 강압형 컨버터 전력제어
Fig. 13 Power Control of Buck converter with Fuelcell Characteristic

그림 14는 부하에 따른 전철변전소(S/S), 보조급전구분소(SSP), 급전구분소(SP) 지점의 전차선과 레일사이의 실효 전압값을 보여준다.



(a) S/S, SSP, SP 지점의 전압(무부하)



(b) S/S, SSP, SP 지점의 전압(차량부하)

그림 14 부하에 따른 S/S, SSP, SP 지점의 전차선-레일간 전압
Fig. 14 Voltage between contact wire and rail at S/S, SSP, SP point according to load

그림 14(a)는 차량부하가 없을 경우 전차선로의 임피던스와 단권변압기(AT)의 폐회로에 따른 전압강하로 S/S 지점에서 24.7[kV]이며, SP 지점에서 23.9[kV] 전압이 인가되었다. 그림 14(b)와 같이 차량부하가 보조급전구분소(SSP)와 급전구분소(SP) 사이에 존재할 때 S/S 지점에서는 23.4[kV], SP 지점에서는 큰 전압강하가 발생하여 15.9[kV]까지 떨어져 차량운영에 영향을 주게 된다.

그림 15는 연료전지 발전시스템을 이용하여 전차선과 레일사이의 급전계통에 연계하였을 때 실효전압을 보여준다. 연료전지 발전시스템을 보조급전구분소(SSP)와 급전구분소(SP) 사이에 급전계통을 설치하여 PLL 제어를 이용하여 전압보상 지점의 상 정보를 받아서 인버터 출력전압과 동기화하여 기동하였다. 시뮬레이션 결과 S/S 지점은 24.7[kV] 전압이며, SP 지점에서는 17.9[kV] 전압강하가 있었다. 차량부하가 있는 상태에서 연료발전시스템이 있을 때와 없을 때를 비교했을 때 SP 지점의 전압이 약 2.0[kV] 정도 상승하는 효과를 얻었다.

한편 전철변전소의 전압이 무부하 상태 전압값까지 상승하는 것을 확인할 수 있는데 이는 차량부하를 연료전지 발전시스템에서 대부분 부담하기 때문에 전철변전소로부터 전류를 공급받는 양이 크게 줄어들기 때문이다.

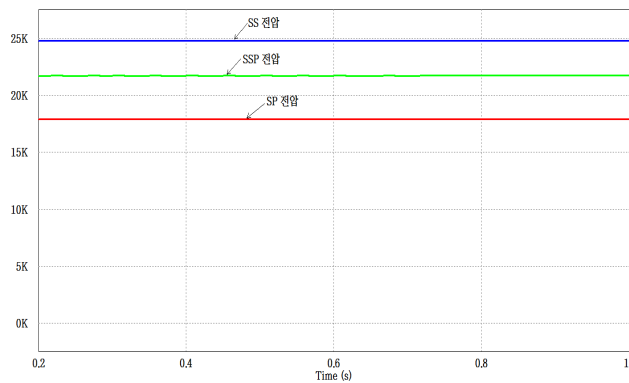


그림 15 S/S, SSP, SP 지점의 전차선과 레일간 전압 (연료전지 발전시스템 적용)

Fig. 15 Voltage between contact wire and rail at S/S, SSP, SP point linked with fuelcell system)

3. 결 론

본 논문에서는 시뮬레이션 프로그램인 PSIM을 적용하여 전기철도 교류 AT급전계통에 대한 모델링을 수행하였다. 또한 최근 철도분야에서 연구되고 있는 연료전지 발전시스템을 교류 AT급전계통에 연계하여 부하인 전기차량 운행에 따른 전압강하를 보상하기 위해 적용하였다. 성능 검증을 위한 시뮬레이션은 SP와 SSP사이에 철도차량이 존재하는 경우에 대해서 수행하였다. 이를 위해 고품질 단상 PLL 알고리즘을 적용하였으며, 연료전지 발전시스템 특성을 갖도록 강압형 컨버터로 전력제어를 하였다. 시뮬레이션 결과 무부하시, 차량부하시, 연료전지 발전시스템을 연계할 경우에 대해 S/S, SSP, SP 지점에서 전차선과 레일사이의 전압강

하를 고찰하였다. 무부하시 각각 24.7[kV], 24.2[kV], 23.9[kV] 전압강하가 있었으며, 차량부하시 전차선로상 임피던스와 차량부하로의 전류 유입에 따른 전압강하로 23.4[kV], 20.3[kV], 15.9[kV] 전압이 인가되었다. 반면 연료전지 발전시스템을 급전계통에 연계한 경우 24.7[kV], 21.7[kV], 17.9[kV]로 연료전지 발전시스템을 통해 급전계통으로 전류가 유입됨에 따라 전철변전소(S/S)에서 공급하는 무효전력이 보상되어 전압상승하는 효과를 얻었다.

따라서 전철변전소 사고 발생시 이동형 연료전지 발전차량에 적용하거나 연장급전시에도 전압강하가 크게 발생한 경우 일시적으로 발전차량 투입을 통한 전압강하 보상이 가능할 것으로 보인다. 향후 철도차량은 차량의 위치 및 사용량이 수시로 변화하는 가변 대용량 부하이기 때문에 철도차량의 위치와 크기의 조건을 달리 하여 전압보상 시뮬레이션을 수행할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구입니다.

References

- [1] Haneol Park, Hybrid Railway Power Quality Conditioner for Autotransformer-fed Electrified Railway Systems, Seoultech, Ph. D. Dissertation, 2011
- [2] Keiji KAWAHARA, "Compensation of Voltage Drop using static Var Compensator at Sectioning post for singansen power Feeding system", RTRI REPORT, Vol.13, NO. 7. 1999
- [3] Hyun-Soo Jung, Seong-Won Bang, and Jin-O Kim, "Compensation of Voltage Drop Using the TSC-SVC in Electric Railway Power Supply System", Journal of KIEE, Vol. 16, No. 3, pp. 29~36 May 2002
- [4] No-Geon Jung, Chin-Young Chang, Sang-Hoon Chang and Jae-Moon Kim, "The Feasibility Study on Small-scale Prototype Electric Railway Vehicle Application using Fuel Cell Generation System", Journal of KIEE, Vol. 63, No. 1, PP. 184-190, 2014
- [5] No-Geon Jung and Jae-Moon Kim et al., "The Analysis of Short Current on Actual System through Power Analysis of AT Feeder System for Electric Railway", Journal of KIEE, Vol. 63, No. 11, PP. 1582-1587, 2014
- [6] Soon-Bong Yoo, "Analysis on the Catenary Voltage of AC Electric Railway Power System", Master's Thesis, 2008
- [7] Tae-Won Chun, Hong-Hee Lee and et al., "Synchronization Techniques for Single-Phase and

Three-Phase Grid Connected Inverters using PLL Algorithm”, Journal of KIPE, Vol. 16, No. 4, PP. 308-316, 2011

- [8] H. Park, J. Han, J. Song, “A Novel Hybrid Railway Power Quality Conditioner for AC Electrified Railway Applications” KSR Conf., pp. 1416-1424, 2010
- [9] Baik Kim, “Study on the Voltage and Current Unbalance Factor due to the Scott Transformer Loading”, KSR, Vol.23, No. 16, 2008
- [10] Sang-Ho Lee, “Evaluation of diagnostic technique system in the autotransformer for electric railway”, Master’s Thesis, 2005

저 자 소 개



김 재 문(Jae-Moon Kim)

1994년 성균관대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 동 대학원 졸업(공학). 2000년~2004년 현대모비스(주) 기술연구소 선임연구원. 2006년 ~현재 국토교통부 철도기술 전문위원, 2004년 3월~현재 한국교통대학교 교통대학원 교통시스템공학과/철도전기전자공학과 부교수

E-mail : goldmoon@ut.ac.kr