

직류 1500V 전기철도용 변전소의 회생인버터 용량 및 설치위치 선정 방법

論 文
55B-9-7

Determining the Capacity and Installation Positions of Regenerative Inverters at DC 1500V Electric Railway Substations

裴昶漢[†] · 漢文燮^{*} · 金容基^{**} · 權三榮^{**} · 朴賢濬^{***}

(Chang-han Bae · Moon-seub Han · Yong-ki Kim · Sam-young Kwon · Hyun-June Park)

Abstract - The paper presents methods of determining the capacity and installation positions of regenerative inverters installed in DC 1500V electric railway system. We suggested a method that approximates using parameters related to substations where regenerative inverters are installed, railway lines and operating motor cars, and another that calculates using regenerative power obtained from Train Performance Simulation (TPS) and Power Flow Simulation (PFS). We carried out TPS and PFS for Seoul Subway Line 5~8, calculating regenerative power and determining substations where regenerative inverters would be installed and the optimal capacity and number of inverters to be installed.

Key Words : Electric Railway Substation, Regenerative Inverter, Regenerative Power

1. 서 론

대부분 우리나라 직류전철시스템에서는 22.9kV의 계통전압을 3상 실리콘 다이오드 정류기를 사용하여 1500V 직류전압으로 변환시키고, 전동차에 역행 전력으로 공급된다. 다이오드 정류기의 경우, 전동차가 회생제동을 할 때 발생하는 회생전력이 전력계통으로 흡수될 수 없기 때문에 근처 역행차량에서 사용하거나, 차량에 탑재된 저항기에서 열로 소비시키고 있다. 하지만, 회생전력 흡수장치인 회생인버터를 다이오드 정류기와 역병렬로 설치하면, 저항기로 소비되는 잉여회생전력을 흡수하고 고압배전단으로 전달해 다시 사용할 수 있다. 이러한 방법은 열로 버려지는 잉여회생전력을 재이용할 수 있기 때문에 에너지 절감효과가 있다. 이 장치는 가선의 회생전력 흡수율을 높임으로서 전동차의 제동 및 ATO 성능을 향상시킬 뿐만 아니라, 브레이크슈의 사용을 줄여 브레이크슈 교체주기를 연장시킬 수 있어, 차량유지보수비용을 줄일 수 있다. 지하공간에서는 브레이크슈 마모에 의한 미세먼지를 줄이고 온도상승을 막을 수 있다. 이러한 장점에도 불구하고 아직까지는 회생인버터의 제작 및 설치비용이 회생전력 재이용으로 얻어지는 비용보다 높기 때문에, 모든 전철용 변전소에 회생인버터를 설치할 수 없다. 따라서 연속경사가 큰 구간이나 회생실효가 문제되는 선구에 설치하고 있으며, 이를 위해서는 정확한 회생전력 발생량을 계산하고, 회생인버터의 적정 설치 위치, 개수 및 용량을 산정하는 기술이 필요하다

[1-3]. 지금까지 전기철도 선진국에서는 전기철도시스템 시뮬레이션을 위한 전력시뮬레이터 개발에 많은 연구가 이루어져 왔으며, 전기철도시스템 설계 단계부터 전력시뮬레이션 프로그램을 사용하여 회생인버터의 설치 위치 및 용량을 설계에 반영하고 있다[4,5].

본 논문에서는 직류 1500V 전철시스템에 설치되는 회생인버터의 용량 산정 및 설치위치를 결정하는 방법을 제시한다. 노선의 회생인버터 설치변전소, 운행노선, 운행 차량에 대한 주요 파라미터들을 사용해 근사화하여 계산하는 방식과, 열차 운행시뮬레이션(Train Performance Simulation, TPS)과 전력시뮬레이션(Power Flow Simulation, PFS)을 이용하여 얻어진 회생전력으로 계산하는 방식을 기술한다. 근사화하는 방식은 간단한 전철 시스템 상수들을 사용하여 계산하는 방식으로 회생인버터 설치를 위한 용량 및 설치위치선정 보다는 전체 전철시스템의 용량계산 검토로 활용될 수 있다. 본 논문에서 제안한 방식은 전력시뮬레이션 결과로부터 회생인버터의 최적 설치 위치와 용량을 계산하는 방식이다. 전력시뮬레이션은 한국철도기술연구원에서 경량전철시스템개발을 위해 만든 프로그램을 사용한다[6,7]. 서울지하철 5~8호선에 대한 TPS&PFS를 실시하고, 회생전력 발생량을 계산하며 회생인버터의 설치 변전소와 적정 용량 및 설치개수를 결정한다.

2. 회생인버터 개요

회생인버터는 잉여회생전력 발생으로 인한 가선전압의 상승을 감지하고, 회생전력을 흡수하여 변전소 고압배전계통으로 전달함으로써 버려지는 에너지를 재활용하도록 한다. 그림1은 전철변전소의 다이오드 정류기와 회생인버터를 나타낸다. 여기서, 12-펄스 다이오드 정류기는 1500V 직류전압을 만들고, IGBT 회생인버터는 잉여 회생전력을 흡수하여 고압배전단으로 전달시켜 소비할 수 있도록 한다.

[†] 교신저자, 正會員 : 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : chbae@krii.re.kr

^{*} 正會員 : 한국철도기술연구원 선임연구원

^{**} 正會員 : 한국철도기술연구원 책임연구원

^{***} 正會員 : 한국철도기술연구원 수석연구원

接受日字 : 2006年 5月 2日

最終完了 : 2006年 7月 18日

회생인버터의 용량은 전동차의 운행간격이 긴 경우 직류 1500V 전압을 공급하는 정류기설비 이상으로도 순간 부하율이 높아지기 때문에 아주 큰 과부하정격이 필요하다. 높은 과부하정격은 회생인버터의 경제성과 설치 면적의 제약이 따르므로 어느 레벨이상의 최대전력은 회생인버터의 전류제한 및 직류전압 상승을 허용하여 회생전력을 실효시키는 방식을 사용하며 이것을 과부하정격으로 인정한다[8].

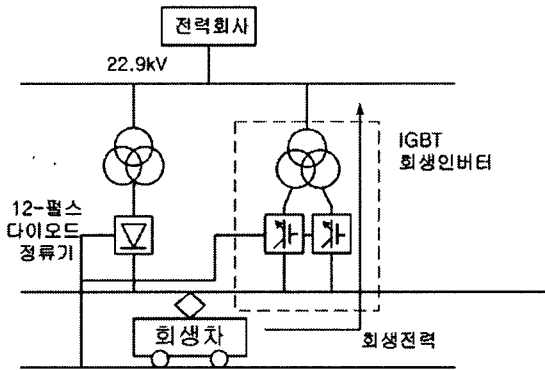


그림 1. 회생인버터가 설치된 직류 1500V 전철 변전소
Fig. 1 DC 1500V electric railway substation with a regenerative inverter

직류전철용 변전소에 설치되는 회생인버터의 적정용량산정을 위해서는 운행 중인 차량의 회생실효를 막고 회생전력 흡수 경로를 만들어 발생되는 회생전력을 측정하는 것이 바람직하지만, 별도의 회생전력 흡수장치와 차량의 회생실효 방지조작이 필요하므로 측정이 용이하지 않다. 따라서, 변전소, 운행노선(캔트, 구배) 및 차량 조건과 다른 노선의 회생전력 발생률을 활용하여 근사적으로 계산하는 방법과 TPS&PFS를 사용해 시뮬레이션으로 계산하는 방식이 있다. 주요 변수를 사용한 근사화 방식으로는 회생인버터가 설치될 노선의 조건, 차량조건, 운전조건에 따라 회생전력 발생량이 크게 달라지기 때문에 정확한 용량결정을 하기가 어렵다. 따라서 노선조건, 차량조건, 변전소조건에 기초한 TPS&PFS를 수행하여 열차의 다양한 운전상황 중에서 잉여 회생전력의 발생량을 계산할 필요가 있다.

3. 회생인버터 용량계산 및 설치위치 선정

3.1 근사화 계산

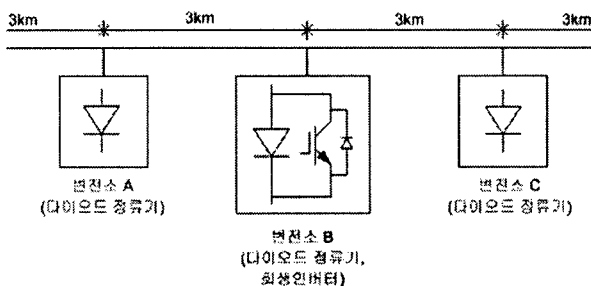


그림 2. 직류 1500V 전철시스템
Fig. 2 DC 1500V electric power system

그림 2는 회생인버터 용량 계산을 위한 직류 전철용변전소의 설치도이고 계산 조건은 표 1에 나타낸다. 그림 2에서 보듯이 12km의 회생담당구간을 가진 1개의 회생인버터가 변전소 B에 설치되어 있으며 이 구간에서 운행되는 열차대수 n 은 식(1)로 얻어진다.

$$n = \frac{l}{v_s \times t_h} \text{ [대수/h]} \quad (1)$$

여기서 l 은 회생인버터가 담당하는 전체 노선의 길이, v_s 는 운행차량의 표정속도, t_h 는 운행시격이다.

1시간 동안의 최대소비전력 P_m 는 열차톤키로정수로부터 다음과 같이 계산된다.

$$P_m = 2n \cdot s \cdot w \cdot l \cdot (1 + a) \cdot k \text{ [kW]} \quad (2)$$

여기서 계수 2는 복선구간을 의미하며, a 는 다이어의 분산에 따른 전력변동 표준편차이며 0.1로 계산한다. 기존의 회생인버터가 설치된 변전소로부터 얻어진 전력회생률과 제동 유효율로부터 계산된다. 전력회생률, λ_1 ,은 회생인버터 설치된 변전소의 최대소비전력 P_m 에 대한 흡수된 회생전력의 비를 의미하고, 제동유효율은 회생인버터가 설치된 변전소가 담당하는 구간 내에서 발생되는 모든 회생전력 중에서 흡수된 회생전력의 비를 의미한다. 여기서 발생된 모든 회생전력값은 근처역행차량에서 소비되는 회생전력과 차량에 의한 회생실효분까지도 포함된 값이다. 문헌[9]의 자료를 참조하면, 전력회생률, λ_1 은 0.20 ~ 0.23값을 갖으며, 제동유효율, λ_2 은 0.63 ~ 0.70을 갖는다. 이들 데이터를 사용하여 회생인버터의 용량을 식(3)와 같이 계산할 수 있다. 여기서 W 는 회생담당 노선에서 발생되는 모든 회생전력 값으로, 근처역행 차량에서 소비되는 회생전력 및 일부분의 회생실효를 포함한 값이다. 따라서 회생인버터의 용량은 노선의 모든 운행조건을 고려할 때 W 보다 큰 값을 선정하면 된다.

$$W = (P_m \times \lambda_1) \times \frac{1}{\lambda_2} \text{ [kW]} \quad (3)$$

제동시에 흡수되는 기계에너지로부터 회생피크전류, I_B 를 구하기 위해 식(4)과 같이 소요제동력, F_B 를 계산할 수 있으며, 속도 v [km/h]의 차량으로부터 발생되는 제동전력은 식(5)로 얻어진다[10,11].

$$F_B = (31 \times \beta - r) \times s \times w \text{ [kgf]} \quad (4)$$

$$P_B = \frac{F_B \times v}{367} \times \eta \text{ [kW]} \quad (5)$$

여기서 η 는 동력전달효율이다. 식(4)과 식(5)를 사용하여 소요제동력 P_B 를 얻고, 회생피크전류를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$I_B = \frac{P_B}{V_{inv}} \text{ [kA]} \quad (6)$$

회생인버터의 적정용량선정을 위해 회생담당구간의 발생가 능회생전력 W 와 회생피크전류 I_B 를 계산하였다. 표 1의 조건으로부터 $W=1480[\text{kW}]$, $I_B=3.5[\text{kA}]$ 로 얻어지며 회생인버터 용량을 1.5MVA, 350% 1분으로 산정하는 것이 적합하다. 이러한 근사화 방식으로 결정된 회생인버터 용량은 노선 조건 및 차량운행조건이 고려되지 않았기 때문에 회생인버터의 설치위치와 용량선정 계산방법으로 사용되기 보다는 전체 시스템 용량 검토용으로 사용될 뿐이다.

표 1. 계산조건
Table 1. Calculation condition

항목	값	항목	값
편성(s)	8[4M4T]	주행저항(r)	10[kg/ton]
시격(t_h)	150[sec]	최고속도(v_m)	80[km/h]
중량(만차, w)	48[ton/량]	표정속도(v_s)	35[km/h]
감속도(β)	3.5[km/h/s]	회생동작전압 (V_{inv})	1650[V]
열차톤키로 정수(k)	50[kW/1000 ton · km]	전력회생율 (λ_1)	0.20
동력전달효율 (η)	0.85	제동유효율 (λ_2)	0.65

3.2 전력시물레이션을 이용한 계산

본 논문에서 사용한 전력시물레이션기법은 TPS와 PFS의 두가지 단계로 구성된다. 먼저 차량 1편성을 대상으로 운영노선과 차량조건등을 사용하여 차량의 운행곡선을 TPS로부터 계산하고, 이 결과와 변전소 파라미터들을 사용하여 일정한 운행시격을 갖고 운행하는 차량들을 모의하고 전철시스템의 전력조류해석이 PFS으로 이루어진다. 이러한 방법들은 전기철도시스템의 차량의 운행에 따른 변전소의 전력상황을 모의 할 수 있어서, 전기철도 변전소의 설계자료에 활용되고 있으며, 최근 전기철도시스템의 고효율화를 위한 전력설비 개발에도 활용되고 있다.

전철변전소에 설치되는 회생인버터의 정확한 용량산정을 위해서는 차량의 운행시격을 반영하여 전철변전소에 회생전력발생량을 계산해야 한다. 여기서는 TPS&PFS를 사용하여 회생인버터의 설치용량 및 설치개수를 변화시키며 노선의 회생실효율을 계산하고 가장 적은 개수로 가장 많은 량의 회생전력을 흡수시킬 수 있는 조건을 찾는다. 회생실효율은 어느 노선에서 발생된 총 회생전력 중에서 차량들에서 열로 소비되는 회생전력과의 비율을 의미하는 것으로 식(7)과 같다. 이렇게 계산된 회생실효율을 가장 큰 폭으로 감소시킬 수 있도록 회생인버터의 최적설치 위치 및 개수를 선정해야 한다. 식(8)은 회생전력의 1시간동안의 RMS(root mean square)값으로 회생인버터의 연속정격값을 결정하고, 최대회생전력의 비율과 전동차의 제동시간을 고려하여 과부하정격을 결정하는데 사용된다.

$$\text{노선의 실효율} = \frac{\text{회생전력량} - \text{회생인버터 출력전력량}}{\text{회생전력량}} \times 100 \quad (7)$$

$$P = \sqrt{\frac{1}{T_s} \int_{t_1}^{t_2} p_{reg}(t)^2 dt} \quad (8)$$

여기서 P 는 회생전력, $p_{reg}(t)$, 의 RMS값이고, T_s 는 1시간으로 계산한다. 회생인버터의 설치위치, 설치 개수, 설치 용량을 결정하는 방법을 그림 3의 블록도로 나타내며, 자세한 내용은 아래와 같다.

1. 노선의 모든 변전소에 회생인버터를 설치한 경우에 대해 전력시물레이션을 수행한다.
2. 변전소들의 회생전력 RMS값을 계산하고 회생전력발생량에 따라 변전소의 순위를 매긴다.
3. 회생인버터 설치 변전소 개수를 회생전력 발생량 적은 순서대로 제거시키면서 전력시물레이션을 실시한다.
4. 변전소의 회생인버터 설치 개수 변화에 따른 회생실효율을 곡선을 그리고 회생실효율곡선의 가장 큰 감소폭을 갖는 곡선을 선정한다.

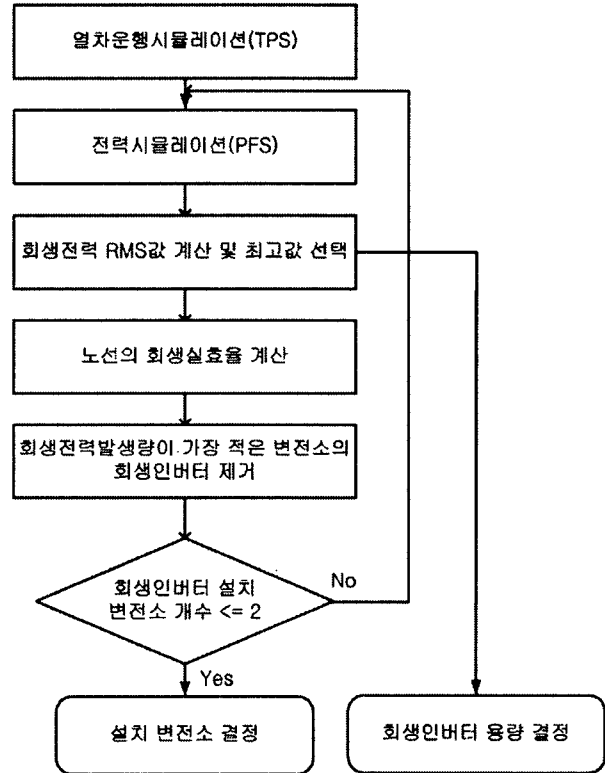


그림 3. 회생인버터 설치 변전소 선정
Fig. 3 Flowchart for substation selection

회생인버터의 설치 위치와 개수가 결정되면, 회생인버터의 정격용량과 과부하용량은 그림 4의 블록도와 같은 방법으로 계산한다. 회생인버터의 정격용량은 설치 변전소에서 얻어진 회생전력의 RMS값으로 하고, 과부하정격은 회생전력 발생량 중 최고 순시치 값과 RMS값의 비율로 결정된다. 또한 지하철 변전소의 잉여회생전력으로 인한 가선전압 상승기간이 1분을 넘지 않으므로 과부하정격은 1분간 지속되는 것으로 선정한다.

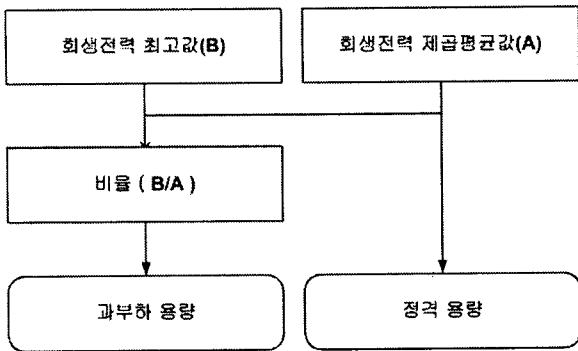


그림 4. 회생인버터 용량결정 절차
Fig. 4 Flowchart for regenerative inverter capacity

4. 시뮬레이션 결과

표 2. 서울 6호선 전력시뮬레이션 조건
Table 2. Simulation condition for Seoul line 6

차량	차량/편성	8(4M4T)
	무게	270.6[ton]
	가속도	3.0[km/h/s]
	감속도	-3.5[km/h/s]
	최고속도	100.0[km/h]
운전	표정속도	35[km/h]
	운행시각	240[sec]
	역정차시간	30[sec]
	교행시차	30[sec]
	보조동력	168.0[kW]
변전소	전철변전소 내부저항	0.02949[Ω]
	변전소에서 전차선까지 저항	0.0007[Ω]
	최대허용 전압	1800[V]
	공칭전압	1500[V]
	무부하전압	1620[V]
시뮬레이션	시간	5000 ~ 8600[sec]
	샘플링시간	1.0[sec]
	허용오차	0.0005[p.u.]

서울 지하철 5~8노선의 VVVF 인버터 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 서울 6호선에 대한 시뮬레이션 조건을 표 2에 나타낸다. 근사화 계산을 이용하여 계산하면 12km 회생인버터 담당구간을 1시간 동안 운행하는 전동차는 $n \approx 6$ 편성이며, $P_m = 3041[kW]$, $W = 936[kWh]$ 이다. 따라서 정격연속용량은 1MVA, 700%, 1분의 과부하용량으로 산정된다. 전력시뮬레이션을 이용하여 계산한 경우, 서울 6호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형은 그림 5와 6과 같다. 그림 5는 회생인버터가 미설치된 변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 전기계동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로

로 가선전압을 상승시키고 있다. 그림 6은 회생인버터가 설치된 변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수함으로써 가선전압의 상승폭은 감소하였다.

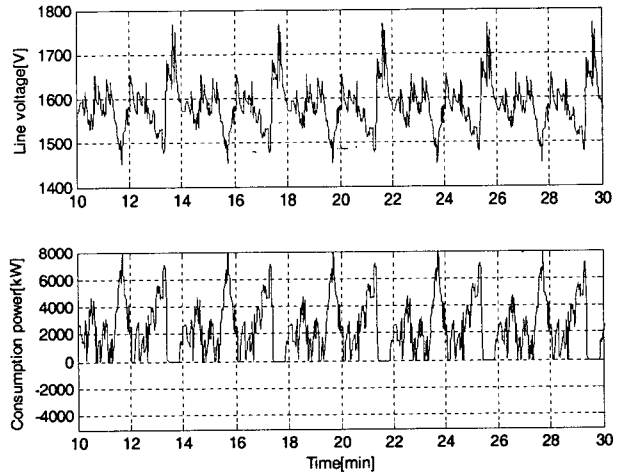


그림 5. 회생인버터 미설치 변전소의 가선전압과 소비전력파형(서울 6호선)
Fig. 5 Line voltage and consumption power waveforms of Seoul line 6 substation without a regenerative inverter

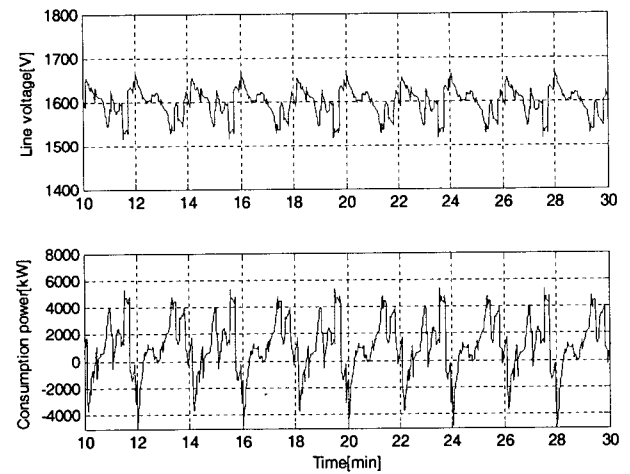
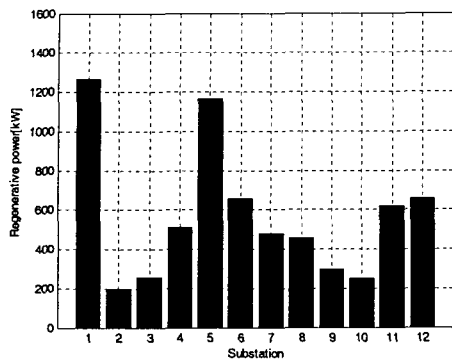
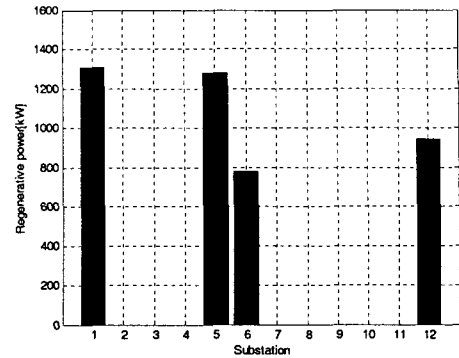


그림 6. 회생인버터 설치 변전소의 가선전압과 소비전력 파형(서울 6호선)
Fig. 6 Line voltage and consumption power waveforms of Seoul line 6 substation with a regenerative inverter

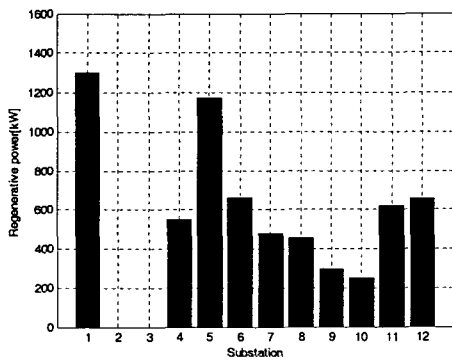
그림 7은 회생인버터 설치가 설치된 변전소의 개수를 변화시키면서, 전력계통으로 전달된 회생전력의 RMS값을 보여준다. 그림 7.(a)는 모든 변전소에 회생인버터를 설치한 경우이며, 각각의 변전소마다 회생전력 발생량이 다른 것은 노선구배, 역간 거리, 차량의 운행조건 때문이다. 그림 7.(b)-(f)는 회생전력 발생량이 가장 적은 순으로 회생인버터를 제거하며 변전소별 회생전력 발생량을 그린 것이다. 회생인버터 설치 변전소의 개수가 감소하면서 근처의 회생인버터가 설치된 변전소의 회생전력 발생량이 다소 증가하였다.



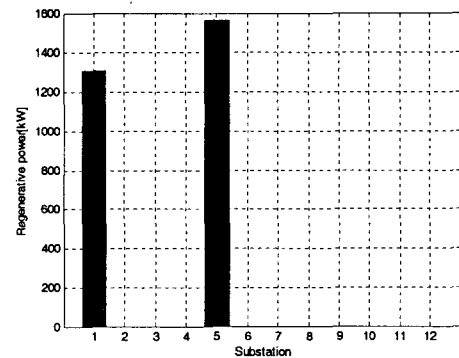
(a) 모든 변전소에 설치 시
(a) Installed in all substations



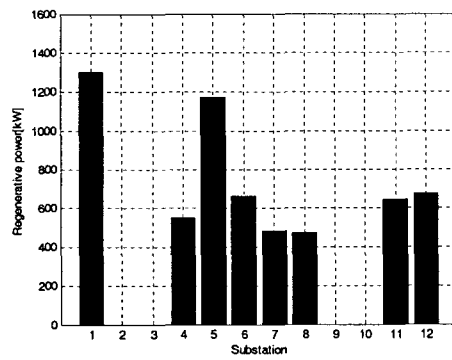
(e) 4개 변전소에 설치 시
(e) Installed in 4 substations



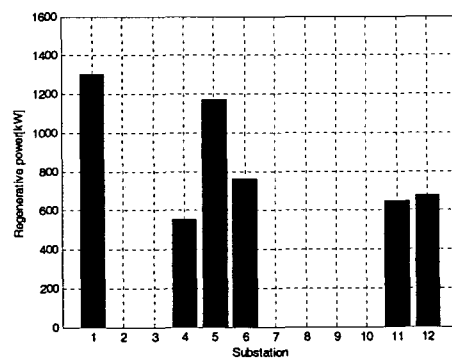
(b) 10개의 변전소에 설치 시
(b) Installed in 10 substations



(f) 2개의 변전소에 설치 시
(f) Installed in 2 substations



(c) 8개 변전소에 설치 시
(c) Installed in 8 substations



(d) 6개의 변전소에 설치 시
(d) Installed in 6 substations

그림 7. 서울 6호선의 회생전력 RMS값

Fig. 7 RMS values of regenerative power in Seoul line 6

아직까지 회생인버터의 초기 설치비용 및 단가가 높기 때문에 모든 변전소에 설치하는 것은 경제성이 크게 떨어진다. 따라서 그림 4에서 보듯이 많은 량의 회생전력 발생 변전소를 중심으로 전체 노선의 회생실효를 가장 낮추는 위치와 개수를 찾아야 한다.

그림 8~11은 서울 5~8호선에 대한 회생인버터 설치개수 변화에 따른 회생실효율 변화곡선을 나타낸다. 그림에서 보듯이 회생인버터의 용량이 증가함에 따라 많은 량의 회생전력을 계통단으로 전달할 수 있어서 회생실효율은 감소되며, 또한 회생인버터의 설치개수가 증가함에 따라 회생실효 곡선이 낮아지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 변전소의 회생인버터 설치개수에 따른 회생실효감소폭은, 즉 곡선별 변동 상황, 일정하지 않다. 이것은 변전소에 따라 회생전력의 발생 량에 차이가 있고 회생전력발생량이 적은 변전소 순으로 회생인버터를 제거하면서 시뮬레이션 하였기 때문이다. 따라서 노선에 대한 최적의 회생인버터 설치개수와 위치는 회생전력 실효율 곡선이 가장 큰 폭으로 낮아지는 경우로 결정한다. 그림 11은 서울 8호선의 경우인데, 8호선은 노선의 길이가 짧고 변전소의 개수가 작기 때문에, 변전소별 회생전력발생 량에 큰 차이가 없으므로 회생실효 곡선의 감소폭이 크지 않다.

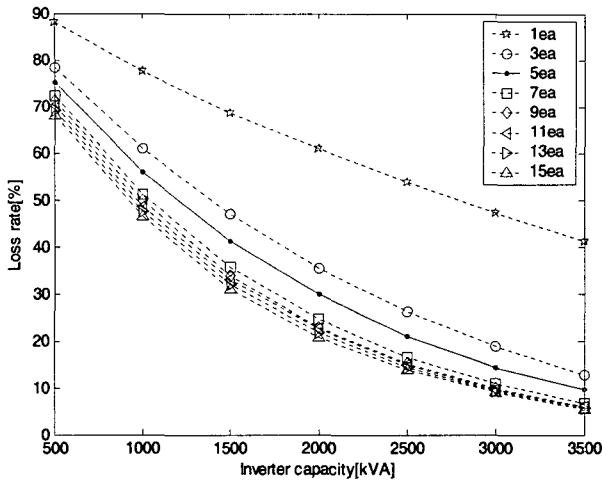


그림 8. 서울 5호선의 회생실효율
Fig. 8 Loss rate of regenerative power in Seoul line 5

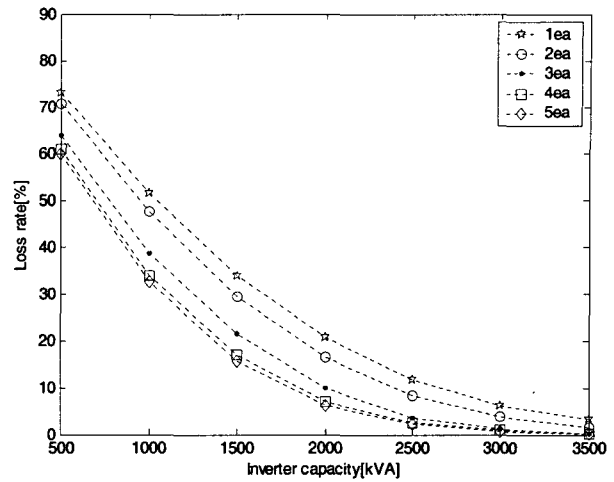


그림 11. 서울 8호선의 회생실효율
Fig. 11 Loss rate of regenerative power in Seoul line 8

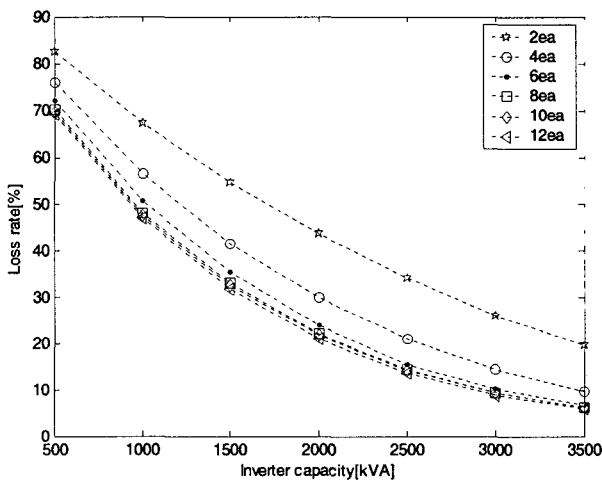


그림 9. 서울 6호선의 회생실효율
Fig. 9 Loss rate of regenerative power in Seoul line 6

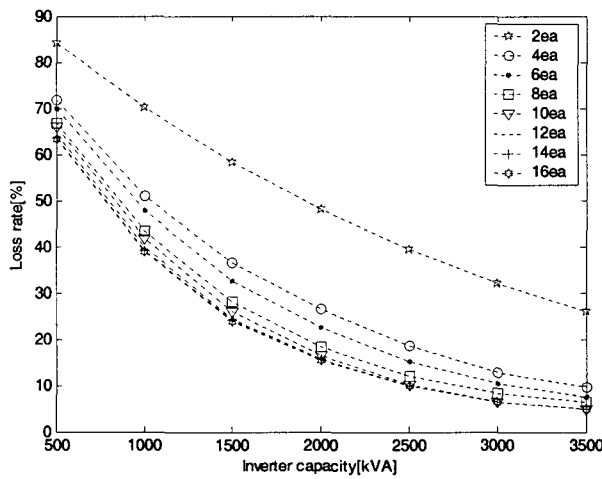


그림 10. 서울 7호선의 회생실효율
Fig. 10 Loss rate of regenerative power in Seoul line 7

표 3 서울 5~8호선 전력시뮬레이션 결과

Table 3. Power simulation results of Seoul subways

선로	변전소명	RMS값 [kW]	최고회생전력값 [kW]	비율 [%]
5	울지로 4가	1449	7102	490
	행당	1284	5664	441
	마장	1350	6554	485
6	응암	1305	6780	520
	대흥	1279	6481	507
	삼각지	780	3827	491
7	신내	941	4833	514
	수락산	1549	9347	603
	남구로	581	3038	523
8	철산	796	3724	468
	천왕	877	4621	527
	석촌	1202	5140	428

6호선의 경우 4개의 변전소에 회생인버터를 설치하는 것이 가장 큰 회생실효율의 감소폭을 얻는다. 더 많은 변전소에 회생인버터를 설치하더라도 많은 양의 회생실효 감소를 기대할 수 없으므로 4개의 회생인버터를 설치하는 것이 바람직하다. 그림 7.(e)에서 보듯이 1, 5번 변전소는 1.5MVA 정격용량의 회생인버터를 설치하고, 6, 12번 변전소에는 1MVA 정격용량의 회생인버터를 설치하는 것이 적합한 것으로 나타난다. 그런데, 5번과 6번 변전소는 서로 접해있는 변전소들이기 때문에 양쪽 모두에 설치하기보다, 5번 변전소에만 설치하는 것이 경제적으로 유리하다. 서울 지하철 5~8노선들에 대해서도 전력시뮬레이션을 수행하였으며 그 결과를 표 3에 나타낸다. 표 3에서 보듯이 각각의 변전소들에서 발생된 회생전력 RMS값 보다 큰 값을 정격용량으로 산정하고 최고회생전력과의 비율을 과부하정격으로 결정하는 것이 최적의 회생인버터 용량이다.

5. 결 론

본 논문에서는 직류 1500V 전철시스템의 회생인버터 설치 시 반드시 고려해야 하는 설치 위치, 설치 개수 및 최적의 설치 용량을 산출하는 방법을 제시하였다. 변전소 및 운행 차량의 조건과 다른 노선의 회생률을 활용하여 간단한 계산으로 회생인버터 용량을 선정하였다. 직류전철시스템의 노선 데이터를 적용하여 TPS&PFS를 수행한 후 각 변전소별 회생실효율 및 회생전력 RMS값을 계산하고 회생인버터의 설치 개수에 따른 회생실효율의 변화를 고려하여 회생인버터의 설치위치와 설치 개수를 결정하는 방식을 제시하였다. 서울 지하철 5~8노선에 대해서 TPS&PFS로 회생인버터의 적정 설치위치와 설치개수, 최적용량을 얻었다.

참 고 문 헌

- [1] P.J. Rndewijk and J.H. R. Enslin, "Inverting DC traction substation with active power filtering incorporated," *IEEE-PESC Conf. Rec.*, vol. 1, pp.360-366, 1995.
- [2] Y.S. Tzeng, R.N. Wu and N.Chen, "Electric network solutions of DC transit systems with inverting substations," *IEEE Trans. vehicular Technology*, vol. 47, no. 4, pp. 1405-1412, Nov. 1998.
- [3] H.D. Fuchs, P.H. Henning and H. du T Mouton, "Development and implementation of a 1.5MW Inverter and Active Power Filter for the Injection of Regenerated Energy In a Spoornet Substation", *IEEE AFRICON*, pp.1119~1124, 2004.
- [4] Y. Cai, M.R. Irving and S.H. Case, "Iterative techniques for the solution of complex DC-rail- traction systems including regenerative braking", *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings*, vol.142, iss. 5, pp.445~452, Sept., 1995.
- [5] Y.S. Tzeng, R.N. Wu and N. Chen, "Unified AC/DC power flow for system simulation in DC electrified transit railways", *Electric power applications, IEE proceedings*, vol.142, iss.6, pp.345~354, Nov., 1995.
- [6] "경량전철 전력공급시스템 기술개발" 연구개발보고서, 한국철도기술연구원, 2004.
- [7] 정상기, 홍재승, "도시철도의 DC 급전시스템 해석 알고리즘", 대한철도학회 춘계학술대회 논문집, pp.78-85, 2000.
- [8] E.J. Goh, K.N. Chu and N.K. Ng, "1500V DC Traction system for the North East Line", *International Conference on Power System Technology-POWERCON*, pp. 1904~1909, Nov. 2004.
- [9] 전철직류급전 시스템 조사위원회, "회생차를 포함한 급전시스템의 현상과 앞으로의 방향", 일본전기학회기술보고 제296호, 1989.
- [10] 김양수, 유해출, "전기철도공학", 동일출판사, 1999.
- [11] 서윤석, "고속철도 전기전인기술", 기전연구사, 2003.

저 자 소 개



배 창 한 (裴 昶 漢)

1971년 8월 26일생. 1996년 2월 아주대 제어계측공학과 졸업. 1998년 2월 동대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2002년 8월 동대학원 전자공학과 졸업(공학). 2002년 8월~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

Tel : 031-460-5417, Fax : 031-460-5459

E-mail : chbae@krii.re.kr



한 문 십 (漢 文 燮)

1964년 11월26일생. 1987년 2월 인하대 전기공학과 졸업. 1989년 2월 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년~1995년 국방과학연구소 연구원. 1996년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원. 2005년~현재 영국 버밍햄대 Railway Research in UK 연구원가.

Tel : 031-460-5420, Fax : 031-460-5459

E-mail : mshan@krii.re.kr



김 용 기 (金 容 基)

1959년 11월3일생. 1987년 서울산업대 화학공학과 졸업. 1991년 연세대학교 화학공학과 졸업(석사). 2003년 서울시립대 재료공학과 졸업(공학). 1994년~현재 한국철도기술연구원 책임연구원.

Tel : 031-460-5382, Fax : 031-460-5319

E-mail : ykkim@krii.re.kr



권 삼 영 (權 三 榮)

1962년 8월 22일생. 1984년 2월 한양대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 한양대 산업대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 1997년~현재 한국철도기술연구원 전력연구팀 팀장/책임연구원.

Tel : 031-460-5425, Fax : 031-460-5459

E-mail : sykwon@krii.re.kr



박 현 준 (朴 賢 濬)

1957년 6월24일생. 1981년 홍익대 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년~1991년 삼성전기(주) 종합연구소 과장. 1992년~1996년 현대중공업(주) 중앙연구소 책임연구원. 2003년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학). 1997년~현재 한국철도기술연구원 전기신호연구본부 본부장/수석연구원.

Tel : 031-460-5400, Fax : 031-460-5459

E-mail : hjpark@krii.re.kr