

직류전기철도변전소의 회생인버터 용량산정에 관한 연구

배창한, 한문섭, 김용기, 장수진*

한국철도기술연구원, *성균관대학교

Study on capacity calculation of regenerative inverter for DC electrified transit substation

C. H. Bae, M. S. Han, Y. G. Kim, and S. J. Jang

Korea Railroad Research Institute, *Sungkyunkwan University

Abstract - This paper presents capability calculation methods for regenerative inverter in DC electrified transit system. The proposed method uses a train performance and power simulation tool to calculate the regenerative power generated in the DC substation and decide the capability of regenerative inverter. The capability of regenerative inverters for Seoul subway line 5, 6, 7, and 8 has been calculated.

변전소, 운행노선 및 차량 조건과 다른 노선의 회생률을 활용하여 근사적으로 계산하는 방법과 전력시뮬레이션을 사용해 계산하는 방식이 있다.

1. 서 론

우리나라 대부분의 직류급전 철도시스템은 22.9kV의 계통전압을 3상 다이오드 정류기를 거쳐 1500V 직류전압으로 변환하고, 전동차에 공급하게 된다. 다이오드 정류기의 경우에는 전동차가 발전제동을 수행할 때 발생되는 회생전력을 계통으로 흡수할 수 없기 때문에 근처 역행차량에서 사용하거나, 차량에 탑재된 저항기에서 열로 소비시키고 있다. 일본의 경우 회생전력 흡수장치인 회생인버터를 다이오드 정류기와 역별릴로 설치하여, 저항기로 소비되는 잉여회생전력을 흡수하고 고압배전단으로 전달해 다시 사용하고 있다. 이러한 방법은 잉여전력의 재사용으로 에너지 절감효과가 있고, 전체 노선의 회생흡수율을 높임으로서 전동차의 전기제동 및 ATO 성능을 향상시킨다. 또한 제동슈의 사용을 줄여 제동수 교체주기율을 연장시킬 수 있어 차량유지보수비용을 줄일 수 있고, 지하공간에서는 제동슈 마모에 의한 미세먼지를 줄이고 윤도상승을 막을 수 있다. 아직까지는 회생인버터의 초기 설치비용이 높기 때문에 연속경사가 큰 구간이나 회생실효가 문제되는 선구에 설치하고 있으며, 이를 위해서는 정확한 회생전력 발생량을 계산하고, 회생인버터의 적정 설치 위치, 개수 및 용량을 산정하는 기술이 필요하다. 따라서 다양한 방법으로 회생전력발생량을 계산하고 예측하는 기법들이 많이 연구되고 있다[1].

본 논문에서는 직류급전시스템에 설치되는 회생인버터의 용량 산정방법을 제시한다. 변전소, 운행노선 및 운행차량에 대한 주요 파라메타를 이용해 근사화하여 계산하는 방식과, 전력시뮬레이션을 이용하여 얻어진 회생전력으로 계산하는 방식을 기술하였다. 전력시뮬레이션은 한국철도기술연구원에서 경량전철시스템개발을 위해 만든 프로그램을 사용하였다[2].

2. 회생인버터 용량산정

변전소에 설치되는 회생인버터의 적정용량산정을 위해 서는 운행 중인 차량의 회생실효율을 막고 회생전력 흡수루트를 만들어 발생되는 회생전력을 측정하는 것이 바람직하지만, 별도의 회생전력 흡수장치와 차량의 회생실효방지조작이 필요하므로 측정이 용이하지 않다. 따라서,

2.1 근사화 방식

그림 1은 회생인버터 용량 계산을 위한 직류급전변전소의 설치도이고 계산 조건은 표 1에 나타낸다.

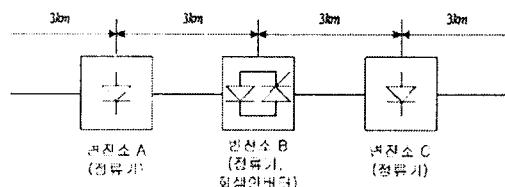


그림 1 직류급전변전소 설치도

표 1 계산조건

항목	값	항목	값
편성, s	8(4M4T)	주행저항, r	10kg/t
운행시계, t_h	2.5분	최고속도, v_m	80km/h
중량(만차), w	48t/량	표정속도, v_s	35km/h
감속도, β	3.5km/h/s	회생동작전압, V_{inv}	1650V
열차토크로 정수, k	50kW/1000t·km	전력회생율, λ_1	0.21
동력전달효율, η	0.85	제동유효율, λ_2	0.65

그림1에서 보듯이 12km의 회생담당구간을 가진 1개의 회생인버터가 변전소B에 설치되어 있으며 이 구간에서 운행되는 열차대수 n 은 식(1)과 같다.

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

열차토크로 정수로부터 1시간 최대전력 P 는 다음과 같이 계산된다.

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

여기서 계수 2는 복선구간을 의미하며, a 는 다이어의 분산에 따른 선력변동 표준편차이며 0.1로 계산한다.

기존의 회생인버터가 설치된 변전소로부터 전력회생율과 제동유효율을 얻을 수 있다. 전력회생율, λ_1 은 다른

변전소에서 측정된 회생전력 W_1 으로부터 식(3)으로 얻어지며 $0.20 \sim 0.23$ 값을 갖는다. 제동유효율, λ_2 은 노선의 회생전력 흡수정도를 나타내는 값으로 식(4)와 같으며 $0.63 \sim 0.67$ 값을 갖는다. 여기서 W_2 는 회생담당노선에서 발생되는 모든 회생전력 값으로, 근처역행 차량에서 소비되는 회생전력 및 일부분의 회생실효율을 포함한 값이다. 따라서 회생인버터의 용량은 노선의 모든 운행조건을 고려할 때 W_2 보다 큰 값을 선정하면 된다. 전력회생율과 제동유효율을 사용해 발생가능회생전력 W_2 은 식(5)과 같다.

$$\lambda_1 = \frac{W_1}{P} \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \frac{W_1}{W_2} \quad (4)$$

$$W_2 = P \times \frac{\lambda_1}{\lambda_2} [\text{kW}] \quad (5)$$

제동시에 흡수되는 기계에너지로부터 회생파크전류, I_B 를 구하기 위해 식(6)과 같이 소요제동력, F_B 를 계산하고, 속도 v 의 차량으로부터 발생되는 제동전력은 식(7)로 계산한다.

$$F_B = (31 \times \beta - r) \times s \times w [\text{kg}] \quad (6)$$

$$P_B = \frac{F_B \times v}{367} \times \eta [\text{kW}] \quad (7)$$

식(6)과 식(7)을 사용하여 소요제동력 P_B 를 얻고, 회생파크전류를 아래와 같이 구할 수 있다.

$$I_B = \frac{P_B}{V_{inv}} [\text{kA}] \quad (8)$$

회생인버터의 적정용량선정을 위해 회생담당구간의 발생가능회생전력 W_2 와 회생파크전류 I_B 를 계산하였다. 표 1의 조건으로부터 $W_2=1366[\text{kW}]$, $I_B=2255[\text{A}]$ 로 얻어지며 회생인버터 용량을 1.4MVA, 300% 1분으로 산정하는 것이 적합하다.

2.2 전력시뮬레이션 방식

그림 2는 전력시뮬레이션을 사용하여 회생인버터의 용량을 선정방법을 나타낸다. 회생인버터의 설치용량 및 설치개수를 변화시키며 전력시뮬레이션을 수행하고 노선의 회생실효율을 계산한다. 여기서 회생실효율은 회생전력량 중에서 차량에서 소비되는 회생전력의 비율을 의미하는 것으로 식(9)와 같다. 계산된 회생실효율로 회생인버터의 최적설치 위치 및 개수를 결정하고 회생전력의 제곱평균값과 최고치를 계산한다. 제곱평균전력값은 회생인버터의 연속정격값을 결정하고, 최대회생전력과 제곱평균전력값의 비율로 과부하정격을 산정한다.

$$\text{실효율} = \frac{\text{회생전력량} - \text{회생인버터전달전력량}}{\text{회생전력량}} \times 100 \quad (9)$$

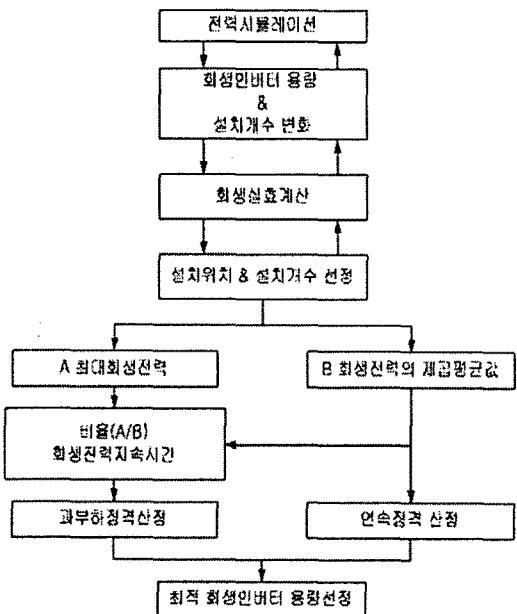


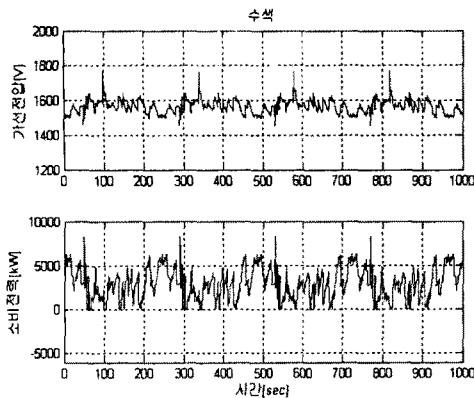
그림 2 전력시뮬레이션에 의한 회생인버터 용량선정

서울 2기 지하철 6호선의 차량 및 노선데이터를 사용하여 전력시뮬레이션을 수행하였으며 시뮬레이션 조건을 표 2에 나타낸다.

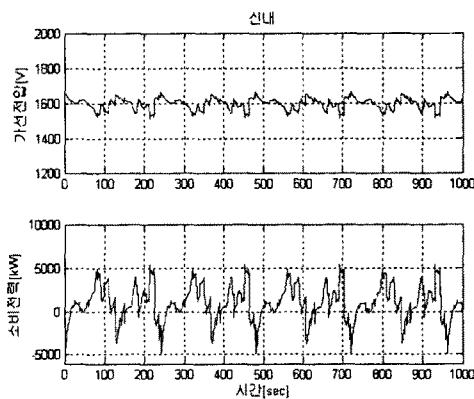
표 2 전력시뮬레이션 조건

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 데이터	표정속도	35[km/h]
	시격	240[sec]
	역정차시간	30[sec]
	교행시차	30[sec]
	보조동력	168.0[kW]
시뮬레이션 데이터	전차선저항	0.03030[Ω/km]
	무부하전압	1620[V]
	시뮬레이션시간	5000 ~ 8600[sec]
	샘플링시간	1.0[sec]
	허용오차	0.0005[p.u.]

그림 3은 서울지하철 6호선에서 회생인버터의 설치 유무에 따른 변전소의 가선전압과 소비전력파형을 보여준다. 그림 3(a)는 회생인버터가 미설치된 수색변전소의 가선전압 및 소비전력파형이며, 전동차의 발전제동으로 인해 발생된 회생전력이 순간적으로 가선전압을 상승시킴을 확인할 수 있다. 그림 3 (b)는 회생인버터가 설치된 신내변전소의 경우이며, 회생전력을 변전소에서 흡수하고 가선전압의 변동폭이 감소하였다.



(a) 회생인버터 미설치 변전소



(b) 회생인버터 설치 변전소
그림 3 변전소의 가선전압 및 소비전력파형

그림 4는 회생인버터의 설치개수를 증가시키면서 각 노선의 회생 실효율을 나타낸다. 회생인버터의 용량이 증가함에 따라, 또한 회생인버터의 설치개수가 증가함에 따라 전동차에서 소비되는 회생실효전력은 감소한다. 변전소에 따라 회생전력의 발생량에 차이가 있으므로 회생인버터 설치 변전소의 개수가 증가하여도 회생실효율을 감소 폭은 점점 작아진다. 2개의 변전소에 설치한 경우보다는 4개의 변전소에 설치 시에 회생실효율의 감소폭이 가장 크므로 4개의 회생인버터 설치가 효과적이다. 그림 5는 4곳의 전철변전소에서 흡수되는 회생전력의 제곱평균값을 나타낸다. 1, 5번 변전소는 1.5MVA 용량의 회생인버터를 설치하고, 6, 12번 변전소에는 1MVA 용량의 회생인버터를 설치하는 것이 적합하다.

서울 2기 지하철 5,7,8노선들에 대해서도 전력시뮬레이션을 수행하였으며 표 3에 나타낸다. 표 3에서 보듯이 각각의 변전소들에서 발생된 제곱평균 회생전력보다 큰 값을 정격용량으로 산정하고 최고회생전력과의 비율을 과부하정격으로 결정하는 것이 최적의 회생인버터 용량이다.

3. 결 론

본 논문에서는 직류급전시스템의 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 선정하는 방법과 전력시뮬레이션에 의한 회생실효율 및 제곱평균회생전력을 이용하는 방법에 대해 설명하였다. 서울 2기 지하철 노선

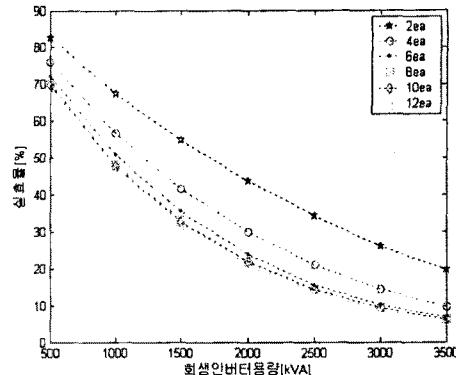


그림 4 회생전력 실효율

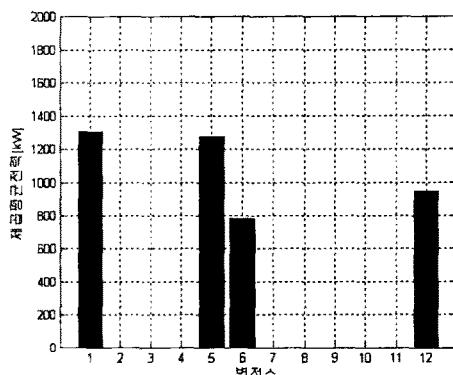


그림 5 변전소 제곱평균회생전력

표 3 전력시뮬레이션 결과

노선	변전소	제곱평균 회생전력 [kW]	최고회생전력 [kW]	비율 [%]
5호선	율지로4가	1449	7102	490
	행당	1284	5664	441
	마장	1350	6554	485
	옹암	1305	6780	520
	대홍	1279	6481	507
	삼각지	780	3827	491
6호선	신내	941	4833	514
	수락산	1549	9347	603
	남구로	581	3038	523
	철산	796	3724	468
	천왕	877	4621	527
	석촌	1202	5140	428
7호선	1	1320	7102	490
	2	1284	5664	441
	5	1279	6481	507
	6	780	3827	491
	12	877	4621	527
	8호선	1202	5140	428

에 대한 전력시뮬레이션으로 회생전력과 회생실효를 계산하여 적정 설치 개수와 위치를 결정하였고, 회생전력의 제곱평균 전력값과 최대회생 전력값으로부터 회생인버터의 적정용량을 선정하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 전철직류급전시스템 최적화 전문위원회, “회생차량에 대응한 직류변전소 용량 설계법”, 일본전기학회기술보고, 1991.1.
- [2] 정상기 외, “경량전철시스템 기술개발사업 4차년도보고서”, 2002.12.