

경량전철시스템의 회생용 인버터 모의방안 및 설치에 대한 경제성 검토

Modelling of the Inverting Equipment for the Regenerated Power in DC Traction Power Supply System and the Economic Feasibility Study on its Installation

정상기* 한석윤** 이안호*** 정락교**** 조홍식*****

Chung, S.G. Han, S.Y. Lee, A.H. Jeong, R.G. Cho, H.S.

ABSTRACT

최근의 도시철도 추진시스템은 VVVF 인버터로 제어되기 때문에 대부분 회생제동의 기능을 갖추고 있다. 회생제동 시 발생하는 전력은 그 때의 동일 노선에서 역행하고 있는 열차에 추진에너지로 사용되는 것이 가장 효율적이거나 그것이 가능하지 않을 경우 혹은 그렇게 사용하고도 남는 잉여회생에너지가 발생할 경우 변전소의 회생용 인버터를 통해 역사 내에서 소비되는 방법도 많이 응용되고 있다. 이를 위해서는 회생용 인버터가 변전소 내에 설치되어야 한다. 본 논문에서는 경량전철시스템의 급전시스템에서 이러한 회생용 인버터의 경제성분석과 적정용량 및 위치에 관해 논의된다.

1. 서론

근래의 DC 전기철도의 추진은 VVVF 인버터로 제어되고 회생제동이 가능하다. 회생제동은 에너지를 재활용할 수 있게 할뿐더러 기계식 브레이크의 사용을 그만큼 줄임으로써 유지보수 비용을 줄이는 일거양득의 매우 이상적인 시스템이다. 그러나 이 회생제동이 가능하려면 열차가 회생제동을 할 때에 생산되는 회생전력이 반드시 소모되어야 한다. 열차가 회생제동 시에 발생하는 회생전력은 우선 동일 노선에서 추진하고 있는 열차의 추진 에너지로 사용된다. 문제는 그렇게 하고도 남는 잉여 회생전력을 처리하는 방안의 선택이다. 첫째 잉여회생전력이 발생할 경우 회생제동을 중단하는 것이다. 현재 서울 지하철에는 이 방법이 적용되고 있다. 둘째는 변전소에 잉여전력 흡수용 인버터를 별도로 설치하여 AC전원으로 재활용 할 수 있도록 두 번째 방법이 에너지를 재활용함으로써 생기는 경제적 이익, 에너지를 적게 씀으로써 공해의 감소, 차량의 유지보수업무의; 감소 등 여러 가지 이점이 있지만 인버터의 설치비용, 인버터 설치로 인해 생기는 새로운 유지보수 비용 발생의 단점이 있으므로 어느 한 방법이 절대적으로 유리할 수는 없고 경우에 따라서 첫 번째 방법 혹은 두 번째 방법이 더 유리할 수 있다. 본 논문에서는 회생차량을 포함한 급전시스템 해석을 위하여 수정되어야 하는 급전시스템 요소들의 모의방법을 제시하고 즉 회생차량, 변전소 및 인버터의 모의방법을 제시하고 이 방법을 이용하여 인버터 선정에 따른 경제성을 검토하고 및 인버터설치를 선정하였을 경우 설치 변전소 및 위치의 선정 기준에 대해서 논의한다.

2. 회생차량을 포함한 급전시스템 모의방안

- * 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원
- ** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원
- *** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원
- **** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 회원
- ***** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 회원

2.1 급전변전소 모의

시스템 내의 전체 회생전력이 점점 커져 시스템 내의 소모전력 보다 커지게 되면 남는 전력은 급전변전소로 되돌아간다. 예를 들어 그림 1의 등가회로 상에서 스위치가 닫혀 있으면 급전변전소는 단순한 전압원으로 모의되어 전력을 외부로 줄 수도 있고 받을 수도 있다. 그러나 단방향 다이오드 정류기를 채택하고 있는 급전변전소에서 회생전력으로 인하여 변전소 모선전압이 무부하전압보다 커지게 되면 다이오드가 역 바이어스 되어 사실상 급전변전소의 전원은 시스템으로부터 분리된다. 그러므로 시물레이션에서도 조류계산 후에 각 변전소의 전압을 검토하여 변전소 출력 단의 전압이 시스템전압보다 높으면 변전소전원을 시스템에서 분리시키고 다시 조류계산을 수행하여야 한다. 이러한 역할을 그림 1의 스위치가 수행하고 실제로 이 스위치 개폐의 구현은 그림2와 같이 변전소 소스저항의 값을 무한대로 하고 I_s 를 0으로 하면 스위치가 열린 것과 같은 결과가 되고 소스저항에 변전소 테브난 등가저항 값을 넣으면 스위치가 닫힌 것과 같은 결과가 된다. 그림 1, 4, 5에서 I_s , R_s 는 급전변전소를 테브난 전압원으로 모의하고 다시 노튼 등가회로로 변환한 것이다. 이상전류원 내 화살표 방향은 실제 전류가 흐르는 방향으로 표시하였다.

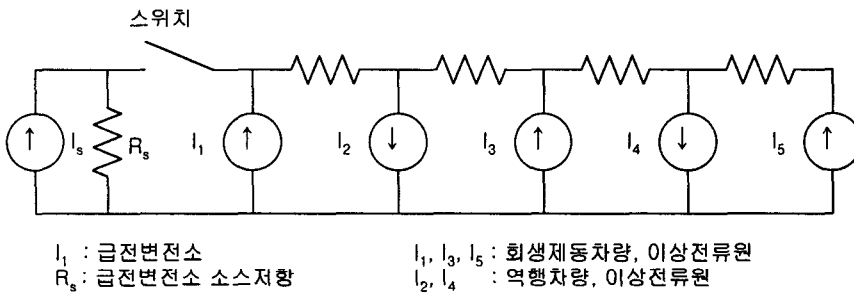


그림 1 급전시스템 등가회로(1)

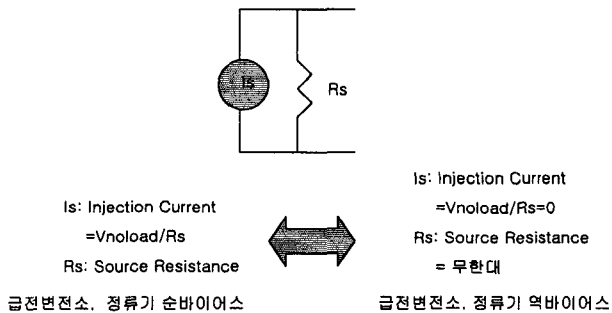


그림 2 급전변전소와 시스템 사이의 가상 Switch On_Off

2.3 회생차량의 모의

전류벡터반복법¹⁾에서 차량의 부하는 이상전류원으로 모의된다. 급전시스템에서 회생전력이 점점 커지면 모든 급전변전소의 전압이 시스템 전압보다 높아져 모든 급전변전소가 시스템에서 분리된다. 그림 1에서 스위치가 개방된 경우와 같다. 그림 1의 회로는 해를 구할 수 없다. 왜냐하면 $I_1 + I_3 + I_5 = I_2 + I_4$ 가 되어 전류원 5개중 최소 1개는 변수로 되어야 하지만 실제의 경우는 5개 모든 이상전류원이 차량의 회생전력양, 즉 요구부하에 의해서 식(3)에 의해 계산된 상수로 입력되기 때문이다. 그러므로 모든 급전변전소가 시스템에서 분리되었을 경우 회생차량을 모의하기 위해서는 등가회로상의 회생제동차량 모델을 수정할 필요가 있다. 실제의 경우는 차량의 회생전력에 의해

차량 내 인버터 DC단의 전압이 일정수준 이상이 되면 회생전력의 일부를 저항기로 소모시켜 인버터 DC 전압이 일정수준 이상으로 올라가지 못하도록 제어한다. 이것의 등가회로 상 구현은 차량부하를 테브난 전압원으로 모의하여 무부하전압을 차량최고전압과 같게 함으로써 수행될 수 있다. 그림 3은 차량을 테브난 전압원으로 모의를 변경한 후 다시 노튼의 등가전류원으로 변환한 것이다. 여기에서 노튼 등가저항 값을 매우 작은 값으로 하는 이유는 단자전압을 항상 차량최고허용전압과 같게 하기 위함이다.

그림 3과 같이 회생제동차량 모의를 전압원으로 수정하면 그림1의 등가회로는 그림 4와 같이 된다. 그림 4의 등가회로와 그림1의 등가회로의 차이는 회생전류와 부하전류의 차이, ΔI , 즉 잉여회생전류를 흡수할 수 있는 저항이 있다는 것이다(식(1)). AC 계통 조류해석 시의 슬랙버스와 유사한 역할을 한다.

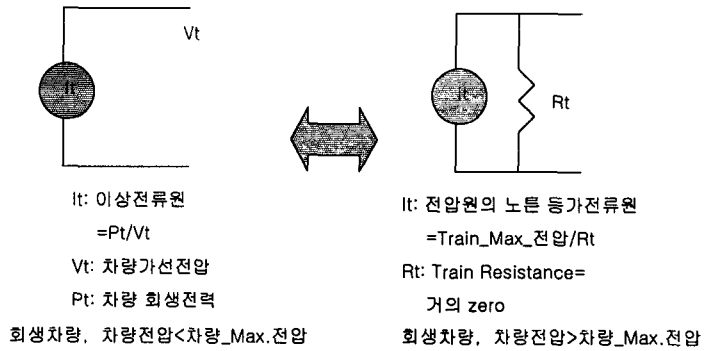


그림 3 차량전압이 차량_Max_전압 이상일 경우 Remodeling

$$\Delta I = I_1 + I_3 + I_5 - I_2 - I_4 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ΔI : 잉여회생전력

회생제동차량의 모델을 전압원으로 전환 시 전압은 차량의 인버터 DC단의 최대 허용전압이다. 이 값은 일반적으로 시스템 전압의 120%이다. 그림 4와 같이 등가회로를 변경한 후 조류계산을 다시 수행하면 회생제동차량 노드에서 계산된 계산전력과 시스템에서 요구하는 요구회생전력의 값이 서로 다르다. 이것은 전압원 모델에 대해서는 전력에 대한 제한조건을 부가할 수 없기 때문이다. 전압원에서 흘러나가는 전력은 시스템의 상황에 따라 변하기 때문이다. 여기에서 만약 계산전력이 요구회생전력보다 작다면 모든 요구회생전력을 다 내 보내기 위해서는 차량최대전압보다 더 높은 전압이 요구된다는 것이다. 다시 말해서 100%회생제동이 안 된다는 것을 의미한다. 만약 계산전력이 요구회생전력보다 크면 그 반대로 차량의 최대전압보다 작은 전압으로서도 요구회생전력을 내보낼 수 있음을 의미하고 이 경우는 회생제동차량의 모의를 다시 이상전류원으로 전환하여(그림 5 참조) 다시 조류계산을 하면 계산전력과 요구회생전력의 크기를 같게 할 수 있다. 그림 10에서 I_1 을 전류원으로 바꾸지 않고 전압원으로 나눈 이유는 모든 전원을 전류원으로 모의하면 회로의 해를 구할 수 없기 때문이다.

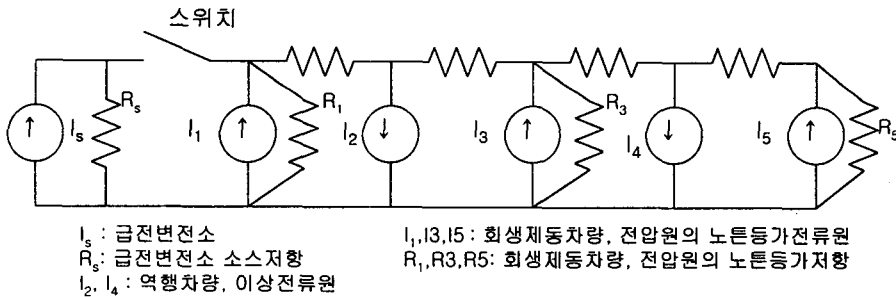
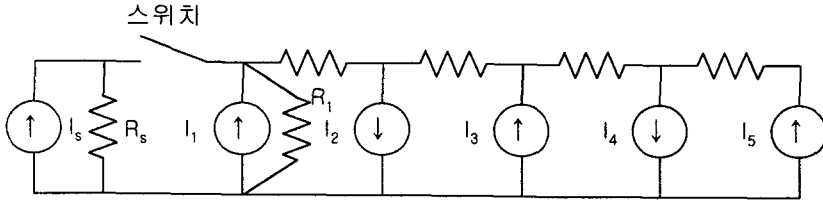


그림 4 급전시스템 등가회로(2)



I_s : 급전변전소
 R_s : 급전변전소 소스저항
 I_1 : 회생제동차량, 전압원의 노튼등가전류원
 R_1 : 회생제동차량, 전압원의 노튼등가저항
 I_3, I_5 : 회생제동차량, 이상전류원
 I_2, I_4 : 역행차량, 이상전류원

그림 5 급전시스템 등가회로(3)

2.3 인버터의 모의

시스템 내의 전체 회생전력이 점점 커져 시스템 내의 소모전력 보다 커지게 되면 남은 전력은 급전변전소에 설치된 인버터에서 AC로 변환되어 유틸리티 전력계통으로 돌아간다. 그러므로 계통의 모의 시에 단순히 인버터만을 모의하여서는 의미가 없고 인버터와 인버터를 통하여 연결된 유틸리티 전체를 모의하여야 한다. 즉 인버터시스템의 모의는 DC 모선 쪽에서 인버터 쪽으로 본 시스템의 모의다. 이것은 급전 변전소의 모의와 크게 다를 바 없다. 다만 급전변전소는 모션전압이 무 부하 전압보다 커지면 시스템에서 분리되고 인버터시스템은 모션전압이 시스템 무부하 전압보다 작아지면 시스템에서 분리되는 것만 다르다. 그러므로 조류계산 후에 인버터 시스템 모션전압을 검토하여 인버터 입력 단의 전압이 시스템전압보다 낮으면 인버터를 시스템에서 분리시키고 다시 조류계산을 수행하여야 한다. 이러한 시스템과 인버터 사이의 스위칭은 그림 6과 같이 수행된다.

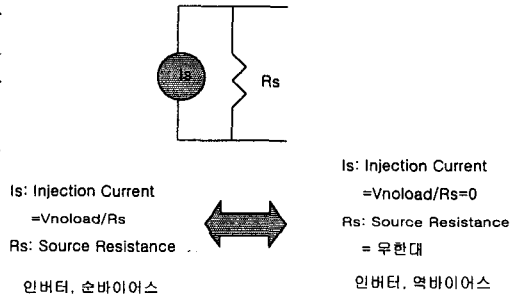


그림 6 급전변전소와 시스템 사이의 가상 SwitchOn_Off

3. 인버터 설치의 효과 분석

위의 알고리즘에 의해 프로그램을 개발한 후 한국철도기술연구원에서 개발하고 있는 경량전철시스템과 목표노선(그림 7)을 적용 시뮬레이션을 수행하였다(1800~3600초). 목표노선에는 6개의 급전변전소가 있으며 회생용 인버터는 변전소에 설치된다. 그림에서 굵은 세로막대는 역사를 표시하며 역사사이의 선은 차량에 전기를 공급하는 전차선이다. 위의 선은 상행선 전차선이며 아래선은 하행선 전차선이다. 각 역사의 위치는 m 단위로 아래에 표시되어 있으며 변전소는 역사 안에 설치되어 있다. 시뮬레이션 목적 상 차량허용최고전압을 1.1 p.u.로 하였다. 표 1은 목표노선에서 인버터를 설치하지 않았을 경우의 회생전력 미사용 현황을 시격에 따라 분석한 자료이다. 시격이 2~3분일 경우는 인버터 없이도 거의 모든 회생전력이 다른 추진 차량에 의해서 소모된다. 시격이 4~6분인 경우에는 회생전력의 약 9% 혹은 전체 공급전력의 3.3%만이 미사용 된다. 시격이 10분 이상이 되면 회생전력의 20% 혹은 공급전력의 7% 이상이 미 사용된다. 이상의 자료에서 보듯이 일반적으로 경량전철시스템에서는 인버터의 채택이 큰 경제적 도움을 주지 못하는 것으로 되어 있다. 다만 특수한 운영환경에 의해서 시격이 통상 10분 이상인 경우는 인버터 설치를 고려해 볼지하다. 표 2는 인버터 설치 위치에 따른 잉여회생전력사용 현황 비교한 표이다. 표에서 상단의 번호는 인버터 설치 변전소의 번호이고 그 이외의 변전소에는 인버터가 설치되어 있지 않다. 표2에서 보듯이 설치 위치에 따른 잉여회생전력의 사용율은 크게 변하지 않는다. 즉 설치 위치는 에너지 활용에 큰 영향을 주지 않는 것으로 나타난다.

표 3은 111변전소 한군데에 인버터를 설치하고 잉여회생전력 현황을 비교하였다. 인버터시스템의 내부저항을 $\frac{1}{2}$ 씩 줄였을 경우에 잉여전력 회수량은 2배씩 증가하지 않고 일정량만큼씩 증가한다. 표 4는 변전소 101 및 변전소 111 인버터를 각각 설치하고 잉여회생전력의 현황을 비교한 표이다. 인버터 내부저항을 $\frac{1}{2}$ 로 감소시키는 것과 인버터를 2곳에 설치하는 것은 비슷한 결과를 나타낸다. 인버터를 1곳에 설치 할 것인지 2 곳에 설치 할 것인지는 시스템 설계 시 다른 요인들과 함께 검토되겠지만 2 곳 설치가 1 곳 설치보다 유리하다는 자료는 없다. 더구나 3곳 이상 혹은 매 변전소마다 인버터 설치 는 불필요한 것으로 보여진다.

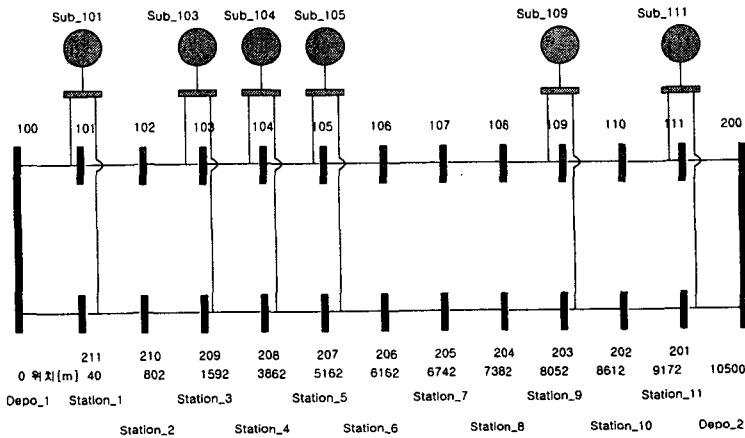


그림 7 목표노선의 역사 및 변전소 위치

표 1 인버터가 설치되지 않은 경우 시격에 따른 회생전력의 사용 현황, 1800~3600초

항목 \ 시격[초]	120	180	240	360	480	600	900
차량소비[kwh]	3212.52	2141.68	1609.560	1070.84	809.70	642.50	428.34
총 회생전력[kwh]	916.12	610.74	455.07	305.37	226.61	183.22	122.15
비사용회생전력[kwh]	1.03	0.	43.30	24.93	39.11	35.77	41.80
사용회생전력[kwh]	915.09	610.74	411.77	280.44	187.50	147.45	80.35
변전소 공급[kwh]	2338.19	1558.50	1217.75	804.26	632.53	503.48	353.51
전차선 손실[kwh]	40.75	27.56	20.02	13.85	10.33	8.42	5.52
사용회생전력 차량소비 ×100[%]	28.49	28.52	25.58	26.19	23.16	22.95	18.76
사용회생전력 공급전력 ×100[%]	39.14	39.19	33.81	34.87	29.64	29.29	22.73
비사용회생전력 총회생전력 ×100[%]	0.11	0.0	9.52	8.16	17.26	19.52	34.22
비사용회생전력 공급전력 ×100[%]	0.05	0.0	3.56	3.10	6.18	7.10	11.82

표 2 인버터 설치 위치에 따른 잉여회생전력의 사용분석, 1800~3600초

인버터 설치변전소	101	103	104	105	109	111
총 회생전력[kwh]	183.22	183.22	183.22	183.22	183.22	183.22
미사용 회생전력[kwh]	27.59	27.46	27.34	27.26	27.20	27.29
변전소회수회생전력[kwh]	8.79	8.86	8.77	8.93	9.36	9.42
전차선 손실[kwh]	8.59	8.50	8.53	8.51	8.47	8.47

표 3 111변전소에 인버터 설치하고 내부저항에 따라 비교

인버터시스템 내부저항 [Ω]	0.4	0.2	0.1	0.05
총 회생전력[kwh]	183.22	183.22	183.22	183.22
미사용 회생전력[kwh]	27.29	20.69	11.35	3.8
변전소회수회생전력[kwh]	9.42	16.75	27.28	36.57
전차선 손실[kwh]	8.47	8.53	8.67	8.85

표 4 101변전소 및 111변전소 양쪽에 인버터 설치

인버터시스템 내부저항 [Ω]	0.4	0.2	0.1
총 회생전력[kwh]	183.22	183.22	183.22
미사용 회생전력[kwh]	20.48	10.83	2.62
변전소회수회생전력[kwh]	16.88	27.79	38.20
전차선 손실[kwh]	8.51	8.62	8.68

5. 결론

중량전철의 상대적으로 높은 건설비로 말미암아 최근에는 건설비가 비교적 저렴한 경량전철이 그 대안으로 떠오르고 있다. 또한 교토 협약 등에 의한 온실가스 감축의 수단으로 에너지 사용 절감이 요구되고 있고 이러한 측면에서 회생전력의 활용을 위한 인버터 설치가 논의되고 있다. 그러나 경량전철시스템에서 잉여회생전력 흡수용 인버터 설치는 일반적으로 경제성이 없는 것으로 분석되었다. 그러나 만약 노선의 특수 상황으로 평균 시속이 10분 이상인 경우는 인버터 설치를 고려할 수 있다. 이 경우도 인버터를 1 개 변전소 혹은 2개 변전소에 설치하면 충분하다. 그 이상은 경제성이 없는 것으로 분석결과가 보여준다.

참 고 문 헌

- 1) Y.Cai, M.R.Irving, S.H.Case, "Iterative techniques for the solution of complex DC-rail-traction systems including regenerative braking", IEE Proc. C., vol 142,1995,