

정전압 DC 급전시스템에서의 회생전력모의를 위한 조류계산 알고리즘

Loadflow algorithm for Fixed voltage DC Electric Power Supply System

정상기* 이병송** 정낙교*** 박성혁**** 이승재*****
Chung, S.G. Lee, B.S. Jung, R.G. Park, S.H. Lee, S.J.

ABSTRACT

The problems in the loadflow study of the fixed voltage DC traction power supply system including the regeneration power is analyzed. And the computer algorithm to avoid the problem is developed. A computer program using the developed algorithm was developed. A test run of the computer program is conducted and the result shows the algorithm and the program developed is very effective for the loadflow study of the system including the regeneration power.

1. 서론

요즈음 차량의 추진시스템은 VVVF에 의해 제어됨으로 인해 회생제동이 가능하게되었다. 일반적으로 급전시스템의 조류해석을 위해서 변전소를 모의할 때는 voltage controlled source로 모의된다. voltage controlled source는 양방향으로 전류를 주고받을 수 있다. 그러나 단방향 다이오드 정류기를 채택한 변전소에서는 역방향의 전류를 허용하지 않는다. 차량 역시 Ideal current source로 모의된다. 그러나 실제의 경우는, 전압에 의해 제어되며 차량의 전압은 또한 다른 차량이나 시스템의 상태에 의해 변한다. 다시 말해서 Ideal current source로 모의할 수 없을 경우도 있다. 본문에서는 이러한 문제들을 분석하고 회생차량을 포함한 전력시스템의 조류해석을 위한 알고리즘에 대해 논의한다.

2. 본문

2.1 조류계산 알고리즘

DC 급전시스템의 해석은 전력공급시스템을 Norton의 등가회로로 모의하고 이 등가회로로부터 Nodal equation(Non-linear)을 세우고 연립방정식(식_1)을 풀어서 수행된다.

$$[G] \cdot [V] = [J] \text{ ----- (1)}$$

여기서 회로의 node 수가 n개 일 때

[G] : n×n conductance matrix

[V] : 1×n voltage vector

[J] : 1×n current injection vector

* 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원
** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 책임연구원, 회원
*** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 회원
**** 한국철도기술연구원 경량전철연구팀 선임연구원, 회원
***** 명지대학교 전기공학과 교수, 회원

Nodal equation이 비 선형이기 때문에 Computer로 풀기 위해서는 Iteration 방법이 사용되고 Iteration 방법은 차량의 모의 방법에 따라 다르다. 차량의 모의는 소위 Conductance Model이라고 하여 차량의 부하를 저항으로 모의하는 방법($G = P_L / V^2$)과 Current Injection Model이라고 하여 차량의 부하를 Ideal Current Source로 모의하는 방법($I = P_L / V$)이 있다. 이 중에서 두 번째의 방법을 사용하는 알고리즘(그림_1)이 유리한 것으로 판단되어[1] 일반적으로 사용되어 왔다

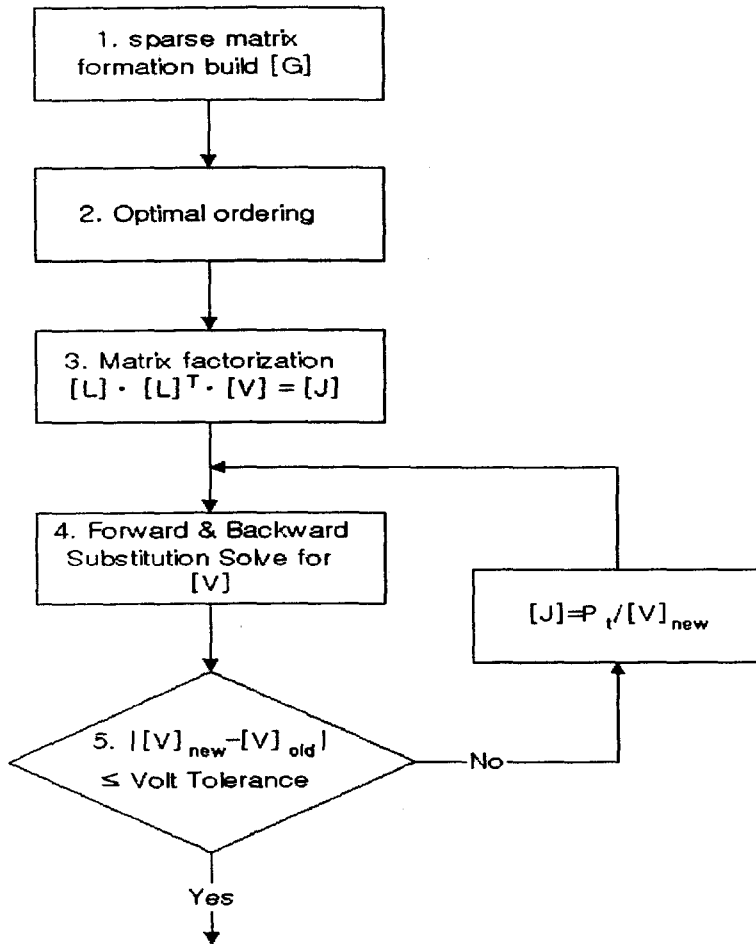
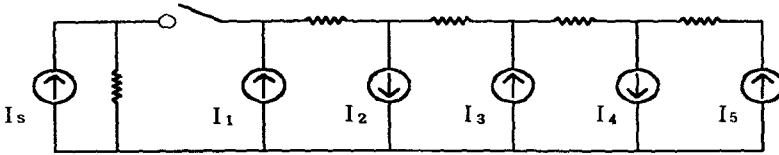


그림 1 Current-vector IterativeMethod

2.2 급전변전소의 모의

시스템 내의 전체 회생전력이 점점 커져 시스템 내의 소모전력 보다 커지게 되면 남은 전력은 급전변전소로 되돌아간다(동가회로 상에서 급전변전소는 Voltage Controlled Source로 모의되어 전력을 외부로 줄 수도 있고 받을 수도 있다). 그러나 단방향 다이오드 정류기를 채택하고 있는 급전변전소에서는 다이오드가 역 바이어스 되어 사실상 급전변전소의 전원은 시스템으로부터 분리된다. 그러므로 시뮬레이션에서도 조류계산 후에 각 변전소의 전압을 검토하여 변전소 출력 단의 전압이 시스템전압(무부하 전압) 보다 높으면 변전소전원을 시스템에서 분리시키고 다시 조류계산을 하여야 한다. (그림_2의 동가회로 참조, 그림_1의 알고리즘 상에서는 Is의 source 저항을 무한대로 하여 [G] matrix를 수정하고 [I] vector에서 해당 변전

소의 source current를 0으로 함).

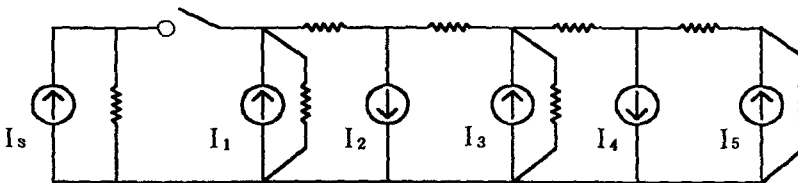


Is : 급전변전소
 I₁ , I₃ , I₅ : 회생차량, Ideal current Source
 I₂ , I₄ : 역행차량, Ideal Current Source

그림 2 . 변전소 역바이어스시의 등가회로(1)

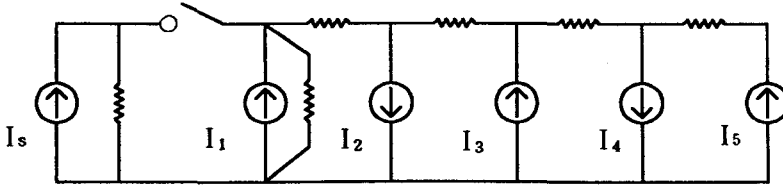
2.3 회생차량의 모의

그림_1의 알고리즘에서 회생차량은 Ideal Current Source로 모의된다. 회생전력이 점점 커지면 모든 급전변전소의 전압이 시스템 전압보다 높아져 모든 급전변전소가 시스템에서 분리된다. 그 결과는 그림_2와 같이 된다. 그림_2의 회로는 분명히 해를 구할 수 없다. ($I_1 + I_3 + I_5 = I_2 + I_4$ 가 되어야 하나 실제 경우 그럴 가능성 거의 없음). 실제의 경우는 차량의 회생전력에 의해 차량 내의 인버터 DC단의 전압이 일정수준 이상이 되면 회생전력의 일부를 저항기로 소모시켜 인버터 DC 전압이 일정수준 이상으로 올라가지 못하도록 한다. 이것은 등가회로로 Voltage Controlled Source와 같다. 그림_2의 등가회로를 이와 같이 수정하면(모든 회생차량의 모의를 Voltage_Controlled_Source로 바꿈) 그림_3과 같이 되며 이 회로는 분명히 해를 가질 것이다. (실제로 그림_2와 그림_3의 회로 상에서의 차이는 회생전류와 부하전류의 차이를 흡수할 수 있는 저항이 있다는 것에 유의할 필요가 있다.) Voltage_Controlled_Source로 전환 시 전압은 차량의 인버터 DC단의 최대허용전압이다. 이 값은 일반적으로 시스템 전압의 110%~120%이다. 그림_3에서와 같이 등가회로를 변경한 후 조류계산을 다시 하면 회생차량의 Calculated Power와 시스템에서 요구하는 Demand Power의 값이 서로 다르다(Voltage controlled Source 모델에는 Demand Power 즉 회생전력에 대한 Constraint가 없으므로 당연하다). 여기에서 만약 Calculated Power가 Demand Power보다 작다면 모든 회생전력을 다 내 보내기 위해서는 차량최대전압보다 더 높은 전압이 요구된다는 것이다. 다시 말해서 100%회생제동이 안 된다는 것을 의미한다. 만약 Calculated Power가 Demand Power보다 크면 그 반대로 차량의 최대전압보다 작은 전압으로서도 Demand Power를 내보낼 수 있음을 의미하고 이 경우는 회생차량의 모의를 다시 Ideal Current Source로 전환하여(그림_4 참조) 다시 조류계산을 하면 Calculated Power와 Demand Power의 크기를 같게 할 수 있다.



Is : 급전변전소
 I₁ , I₃ , I₅ : 회생차량, Voltage Controlled Source
 I₂ , I₄ : 역행차량, Ideal Current Source

그림 3 . 변전소 역바이어스시의 등가회로(2)



I_s : 급전변전소
 I_1 : 회생차량, Voltage Controlled Source
 I_3, I_5 : 회생차량, Ideal Current Source
 I_2, I_4 : 역행차량, Ideal Current Source

그림 4. 변전소 역바이어스시의 등가회로(3)

2.4 알고리즘

이상의 논리를 이용한 알고리즘은 그림_5와 같다. 여기에서 또 한가지 주의하여야 할 점은 모든 회생차량을 Ideal Current Source로 할 수 없고 최소한 1개는 언제나 Voltage Current Source로 남아야 해를 구할 수 있다.(이유는 그림1.에서 자명하고 급전변전소 중 1개만이라도 시스템에 연결되어 있으면 모든 회생차량을 Current Source하여도 좋음)

2.5 Test Run

위의 알고리즘에 의해 프로그램을 개발한 후 한국철도기술연구원에서 개발하고 있는 경량전철시스템에 적용 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션 결과 중 회생에너지에 의해서 변전소가 역 바이어스 된 경우 몇 개가 도표_1~도표_3까지 제시되었다. 도표의 Src_Type에서 'n'은 전원이 아님을 나타내고 'c'는 Current Source 전원, 'v'는 Voltage Controlled Source를 각각 나타낸다. 또한 Node_Type에서 's'는 변전소, 't'는 차량, 'p'는 정거장, 'x'는 정거장에 정착하여있는 차량을 각각 나타낸다. 도표_1에서 보면 0번에서 5번까지의 변전소 중 4, 5번 변전소는 잉여회생전력에 의해 역 바이어스 되어 전원이 시스템에서 분리되었다(Source='n'). 변전소가 모두 시스템에서 분리되지 않았기 때문에 어느 회생차량도 voltage controlled source(Src_Type='v')로 되지 않았다. 따라서 모든 회생차량의 회생제동이 100%가능한 것을 보여준다(Demand_Power=Calculated_Power). 한편 도표_3에서 보면 모든 변전소의 전원이 시스템에서 분리되었다. 따라서 회생차량 노드 중 1개(21번 node)는 voltage controlled source로 바뀌었다. 나머지 차량은 voltage controlled source로 모의된 후 조류해석 결과(계산 중간과정이므로 본문에 나와 있지 않음), Demand Power의 크기가 Calculated Power의 크기보다 작기 때문에 Current source로 다시 모의된 것이다. 물론 이 경우는 100% 회생제동이 가능하여 도표에서 보듯이 Demand Power와 Calculated Power가 같게 나온다. 21번 node의 경우는 Demand Power의 크기와 Calculated Power의 크기가 다르다. 당연히 Demand Power의 크기가 Calculated_Power보다 더 크게된다.(아니면 모든 변전소가 역 바이어스로 되지 않음). 따라서 21번 node의 차량은 100% 회생제동이 불가능하다. 그림_6~8은 각각 도표_1~3의 경우 시스템의 전압 및 위치를 그림으로 보여준다

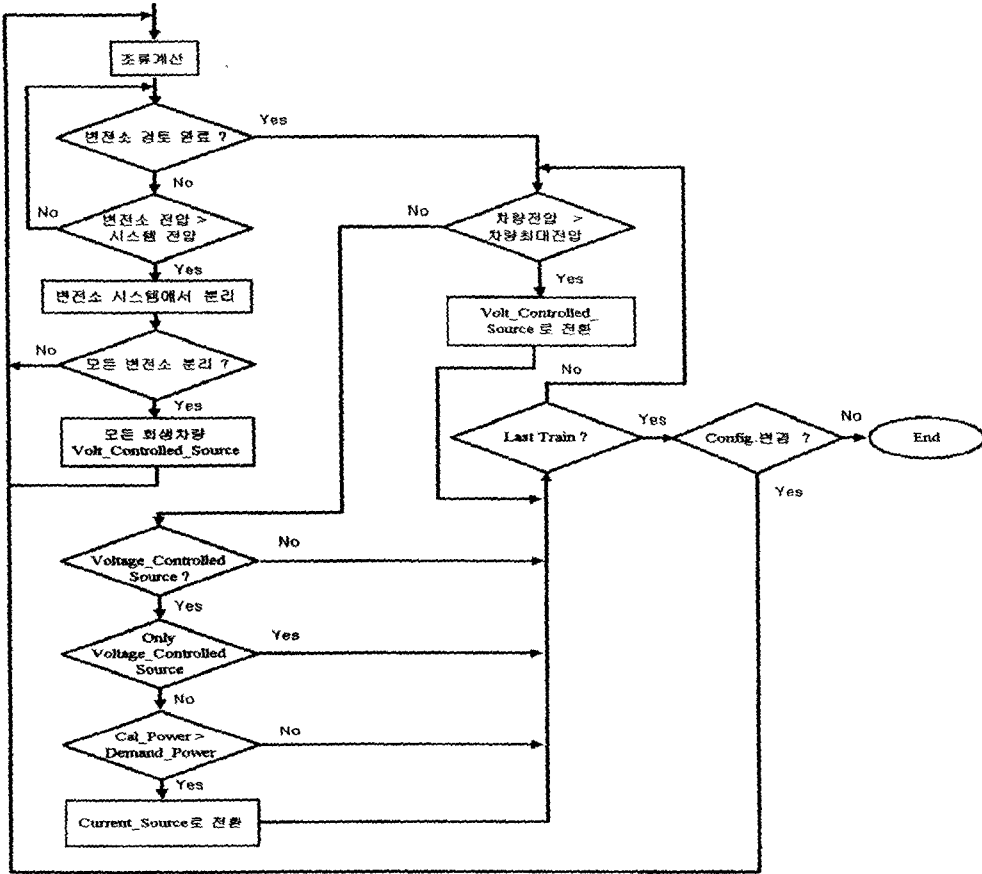


그림 5 희생차량을 위한 조류계산 알고리즘

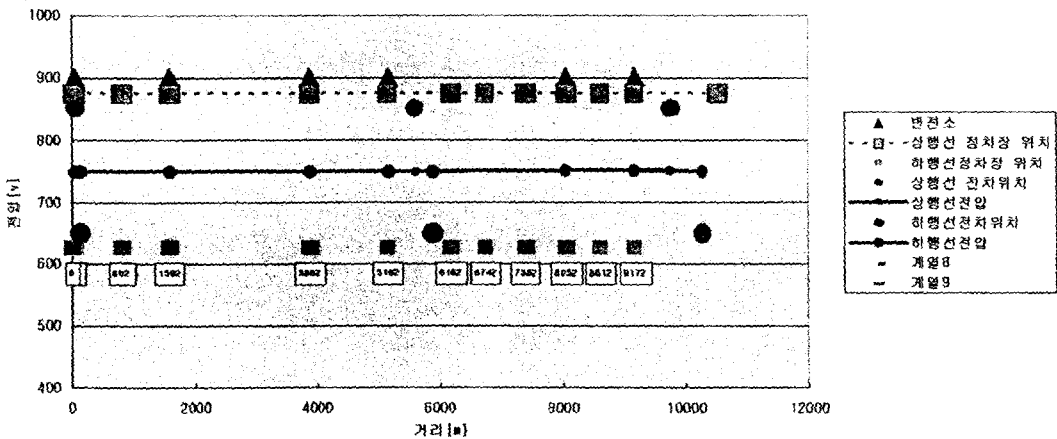


그림 6 전차선전압, Time=1225

도표 1. Node Status, Time=1225

NodeNo.	NodeType	위 치	전 압	SrcType	Demand_Pwr	Cal_Pwr
0	s	40	0.9993	v	0	-0.014
1	s	1592	0.9996	v	0	-0.01
2	s	3862	0.9997	v	0	-0.006
3	s	5162	0.9997	v	0	-0.005
4	s	8052	1.0004	n	0	0
5	s	9172	1.0008	n	0	0
6	p	40	0.9993	n	0	0
7	p	1592	0.9996	n	0	0
8	p	3862	0.9997	n	0	0
9	p	5162	0.9997	n	0	0
10	t	5590	0.9997	c	0.015	0.015
11	p	8052	1.0004	n	0	0
12	p	9172	1.0009	n	0	0
13	t	9735	1.0025	c	-0.285	-0.285
14	t	10723	0.9983	c	0.258	0.259
15	p	11828	1.0007	n	0	0
16	p	12948	1.0004	n	0	0
17	t	15136	0.9997	c	0.015	0.015
18	p	15838	0.9997	n	0	0
19	p	17138	0.9997	n	0	0
20	p	19408	0.9996	n	0	0
21	t	20872	0.9993	c	0.015	0.015
22	p	20960	0.9993	n	0	0
23	x	40	0.9993	c	0.015	0.015

Time= 1226

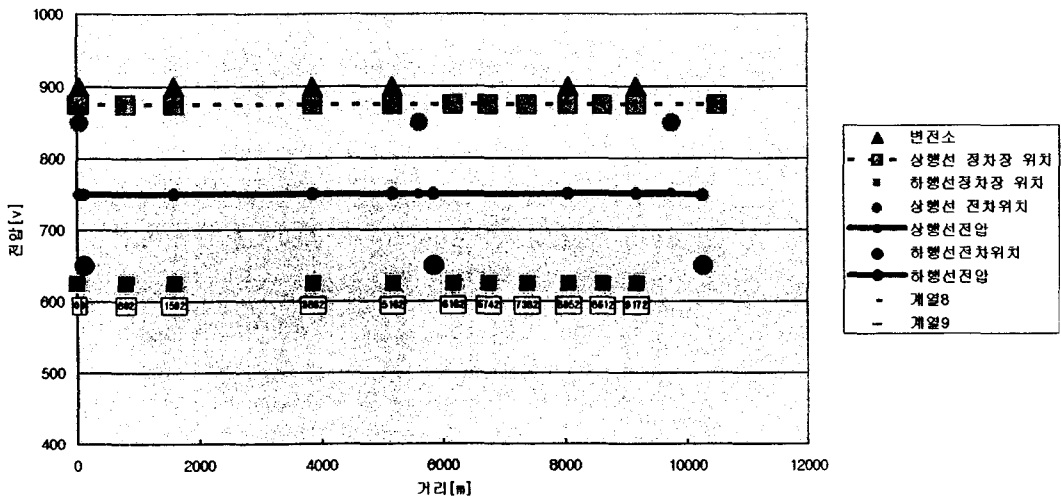


도표 2 Node Status, Time=1226

NodeNo.	NodeType	위 치	전 압	SrcType	Demand_Pwr	Cal_Pwr
0	s	40	0.9993	v	0	-0.015
1	s	1592	0.9996	v	0	-0.01
2	s	3862	0.9997	v	0	-0.006
3	s	5162	0.9997	v	0	-0.005
4	s	8052	1.0004	n	0	0
5	s	9172	1.0007	n	0	0
6	p	40	0.9993	n	0	0
7	p	1592	0.9996	n	0	0
8	p	3862	0.9997	n	0	0
9	p	5162	0.9997	n	0	0
10	t	5600	0.9997	c	0.015	0.015
11	p	8052	1.0004	n	0	0
12	p	9172	1.0009	n	0	0
13	t	9747	1.0025	c	-0.281	-0.281
14	t	10738	0.9983	c	0.255	0.255
15	p	11828	1.0006	n	0	0
16	p	12948	1.0004	n	0	0
17	t	15152	0.9997	c	0.015	0.015
18	p	15838	0.9997	n	0	0
19	p	17138	0.9997	n	0	0
20	p	19408	0.9996	n	0	0
21	t	20884	0.9993	c	0.015	0.015
22	p	20960	0.9993	n	0	0
23	x	40	0.9993	c	0.015	0.015

Time= 1227

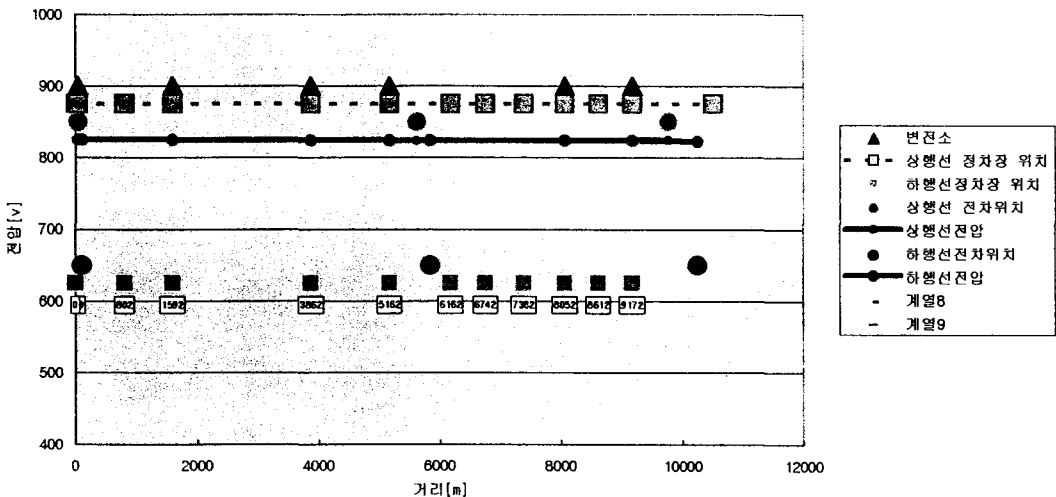


도표 3 Node Status, Time=1227

NodeNo.	NodeType	위 치	전 압	SrcType	Demand_Pwr	Cal_Pwr
0	s	40	1.0999	n	0	0
1	s	1592	1.0994	n	0	0
2	s	3862	1.0987	n	0	0
3	s	5162	1.0983	n	0	0
4	s	8052	1.0982	n	0	0
5	s	9172	1.0982	n	0	0
6	p	40	1.0999	n	0	0
7	p	1592	1.0994	n	0	0
8	p	3862	1.0987	n	0	0
9	p	5162	1.0983	n	0	0
10	t	5610	1.0982	c	0.015	0.015
11	p	8052	1.0982	n	0	0
12	p	9172	1.0983	n	0	0
13	t	9757	1.0995	c	-0.254	-0.254
14	t	10753	1.0959	c	0.252	0.251
15	p	11828	1.0981	n	0	0
16	p	12948	1.0982	n	0	0
17	t	15167	1.0981	c	0.015	0.015
18	p	15838	1.0983	n	0	0
19	p	17138	1.0987	n	0	0
20	p	19408	1.0994	n	0	0
21	t	20895	1.1	v	-0.27	-0.043
22	p	20960	1.0999	n	0	0
23	x	40	1.0999	c	0.015	0.015

3. 결론

회생제동은 에너지의 재활용 측면과 함께 기계식제동장치의 가동시간을 줄이는 등 일거양득의 이상적인 방법이다. 그러나 회생제동은 회생제동 시 발생하는 전력을 누군가 소모하여 주어야 가능 한 것이다. 회생전력의 활용을 위한 인버터, 혹은 단지 회생전력을 소모시키는 저항기 등이 필요할 경우도 있다. 시스템의 설계 시에 이러한 시스템의 타당성 검토와 용량의 선정 시 본문에서 논의된 알고리즘 및 프로그램은 매우 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- [1] 한국철도학회, “도시철도의 DC급전시스템 해석 알고리즘” 춘계학술대회, 2000.