

PWM 정류기를 적용한 직류급전시스템의 조류계산에 대한 연구

A Study on Power Flow Analysis of DC Traction Power Supply System with PWM Rectifier

김 주 락*
(Joorak Kim)

Abstract - In general, Diode rectifier has been applied to DC traction power supply system. Diode has some characteristics which is voltage drop in inverse proportion of load because of non-controlled switch, and cannot flow a current in reverse bias. So, voltage drop occurs frequently, and regenerated power cannot use in substation. The PWM rectifier is able to control output voltage constantly to reduce voltage drop and to use regeneration power without additional inverter. This paper proposes analysis algorithm for DC traction power supply system with PWM rectifier

Key Words : DC Traction power supply system, Power flow analysis, Voltage drop

1. 서 론

도시철도에서는 전동차에 전력을 공급하기 위해 전철변전소에 서 교류전력을 직류로 변환하여 전차선로를 통하여 공급하고 있다. 따라서 도시철도 전철변전소에는 전력 계통으로부터 수전 받은 교류 전력을 직류로 변환해주는 전력변환장치들이 설치되어 있으며, 국내 직류급전시스템에서는 대부분 다이오드 정류기 또는 사이리스터 정류기를 활용하고 있다. 특히, 다이오드 정류기는 부산지하철 1, 2호선을 제외한 모든 직류 급전시스템에서 채용하고 있다[1,2].

한편, 다이오드는 정류되는 파형의 제어가 불가능하고, 역방향 전류 도통이 불가능한 특성을 가지고 있기 때문에, 다이오드 정류기가 적용된 전철변전소의 인출 전압은 부하전류에 반비례하여 감소하는 전압 특성을 보인다. 또한, 전동차에서 발생한 회생전력의 재활용이 불가능 하다[1-3]. 이에 반하여 IGBT(Insulated-Gate Bipolar Transistor)와 같은 완전제어 스위치를 활용한 정류기는 출력전압을 제어할 수 있어 직류 급전시스템의 전압강하를 줄일 수 있으며, 회생전력의 활용이 가능하여 별도의 회생용 인버터 또는 에너지저장장치가 필요 없는 장점을 가진다. 일반적으로 완전제어 스위치를 이용한 정류기들의 제어는 PWM(Pulse Width Modulation)제어 방식을 이용하므로 본 논문에서는 PWM 정류기라 칭한다[4-6].

한편, 전력조류의 해석은 전력계통의 설계 단계에서부터 설비의 추가, 계통계획, 진단 등의 여러 목적에 기반하여 수행된다.

특히 설비 추가의 목적에서, 전력조류해석은 기존 계통에 대한 추가 설비의 효과를 검증하고, 이에 따른 계통의 영향을 해석하는 계통 관리의 측면과, 설비의 용량 및 신뢰성 등을 고려하여 추가 설비의 사양을 검토하는 설비 사양 결정의 측면에서 매우 중요하다. 마찬가지로 PWM 정류기를 급전시스템에 적용하기 위해서는 PWM 정류기의 해석 모델이 포함된 조류계산을 통하여 그 용량 등의 사양을 결정할 수 있다. 그러나 기술한 바와 같이 기존의 다이오드 정류기가 수동소자 특성인데 반하여 PWM 정류기는 능동적인 설비이므로 정전압 제어 특성 및 회생전력 도통 등의 특성을 반영한 새로운 조류계산 알고리즘이 필요하다.

본 연구에서는 PWM 정류기가 포함된 직류급전시스템의 조류계산을 위한 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 노드방정식으로 구성하여 해를 구하는 방법론을 이용하였으며, 전압 제어특성을 반영한 공급전압과 회생전압에 의한 변전소 전압을 제어하는 기법을 추가하여 이에 의한 조류 영향을 분석할 수 있다.

2. PWM 정류기가 적용된 직류급전시스템

일반적으로 국내 도시철도의 전력공급시스템은 직류급전시스템을 채용하고 있으며, 다이오드 정류기를 이용하여 한국전력으로부터 받은 3 ϕ 22.9[kV]의 전력을 직류로 변환하여 전동차에 공급한다. 기존 다이오드 정류기는 순방향 바이어스일 때, 도통이 되고 순방향 전류와 반대 극성의 전압일 때 턴-오프 된다. 더불어, 출력전압을 제어할 수 없어 부하전류에 반비례하여 전압강하가 발생한다.

반면, PWM 정류기는 IGBT 등과 같은 완전 제어 스위칭 소자를 이용하여 입력된 교류전력을 제어하여 직류로 변환하기 때

* Corresponding Author : Dept. of Metropolitan Transportation Research Center, Korea Railroad Research Institute, Korea.
E-mail: jrkim@krii.re.kr

Received : October 5, 2016; Accepted : October 24, 2016

에 자기 용량 한계내에서는 출력전압의 제어가 가능하다. 그림 1은 다이오드 정류기의 전압은 부하전류에 반비례하게 감소하고, PWM 정류기의 경우 정전압 제어가 가능한 특성을 보인 것이다 [2]. 또한, PWM 정류기는 순반향 전류의 반대 극성의 전압이 인가되어도 도통이 가능하기 때문에 도시철도에서 빈번하게 발생하는 회생전력의 재활용이 별도의 설비 없이 가능하다는 장점이 있다[1]. 그림 2는 PWM 정류기를 적용한 전철변전소의 개략도를 보인 것이다.

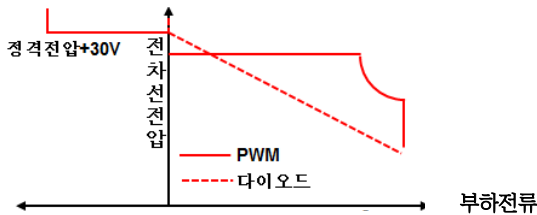


그림 1 다이오드 및 PWM 정류기의 전압전류 특성
 Fig. 1 V-I Characteristics of diode and PWM rectifiers

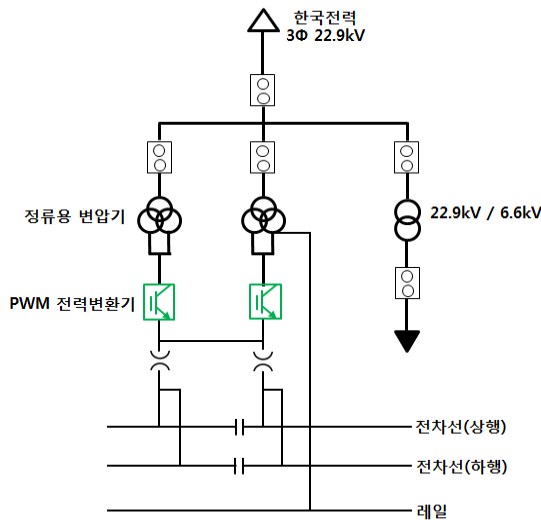


그림 2 제안하는 직류 전철변전소 개략도
 Fig. 2 Proposed dc traction power supply system

직류 급전시스템의 전력공급 방식이 정전압 제어가 가능한 PWM 정류기로 변화한다면, 실제 계통에 적용하기 위해서는 PWM 정류기의 용량설계가 필요하고, 이를 위해 PWM 정류기의 해석 모델이 포함된 직류 급전시스템의 조류계산 알고리즘이 필요하다. 기존 다이오드 정류기는 직류로 변환된 출력측을 직류 독립전원과 내부저항으로 모델링하여 부하전류 크기에 따라 전압이 선형적으로 감소하던 특징을 보였다. 그러나 PWM 정류기는 앞서 언급한 바와 같이 직류 출력 전압이 자기 용량내에서 목표값으로 제어가 가능하기 때문에 기존 정류기와는 전혀 다른 특성

의 전철변전소 모델링이 필요하고 이를 해석할 알고리즘도 기존 방식으로는 불가능하다.

3. 정전압 제어형 정류기를 고려한 조류계산 알고리즘

단방향의 다이오드 정류기를 적용한 직류도시철도 시스템 전력해석 알고리즘은 변전소의 고정 위치와 차량의 가변 위치를 고려하여 특정 시점에서 시스템의 컨덕턴스 매트릭스를 구성하고, 차량의 가변 전력과 차량의 전차선-레일 간 전압을 고려한 전류행렬을 기반으로 반복계산법을 적용함으로써 시스템의 각 노드의 전압을 해로 찾는 방법을 적용한다[7]. 그러나 본 논문에서 제안하는 PWM 정류기의 적용에 따른 도시철도 시스템 전력해석은 다이오드 정류기와 달리 정류장치의 무부하전압이 고정적이지 않다는 점과 양방향의 전력조류를 허용한다는 점에서 기존 해석 알고리즘을 적용하기에 한계가 존재한다. 이에 본 절에서는 기존 알고리즘의 한계점을 개선하여 PWM 정류기를 고려한 새로운 직류도시철도 전력해석 알고리즘(그림 3)을 제시한다.

그림 3에 나타난 알고리즘은 기존 전력해석 알고리즘의 기본 방정식인 $I=YV$ 와 반복계산법을 적용하여 다이오드 정류기를 가정하고 전력해석을 수행한다. 그러나 앞서 언급한 바와 같이 PWM 정류기는 변전소 모션전압이 공급전압(V_{SV}) 또는 회생전압(V_{RV})으로 고정되도록 무부하전압을 제어하기 때문에 그림 3의 'Part A'에서와 같이 변전소 동작모드(공급 또는 회생)를 검출하여 해당 모드의 전압으로 고정되도록 해석을 재해석을 수행하기 위한 기반 데이터를 구성한다.

변전소 동작모드 검출의 결과를 기반으로 $I=YV$ 의 방정식에서의 전압벡터(V)에 대한 수정이 이루어져야 한다. 즉 변전소 가선 전압의 값이 두 동작모드의 전압 중 하나로 고정되고, 이에 따라 전류벡터(I)의 변전소 전류의 값이 상수에서 변수로 전환되어야 한다. 이러한 과정이 반영된 시스템 방정식을 반복계산법 적용을 통해 해를 구하기 위해서는 전환된 변수 간의 위치 변화가 이루어져야 하고, 이것은 'Part B'에서 제시하는 변수 교환 기법의 적용으로 가능하다. 'Part B'는 식 (1)의 시스템 방정식을 식 (2)와 같이 임의의 변수를 교환함에 따른 시스템 행렬을 계산하는 과정이다. 변수의 교환은 PWM 정류기를 고려하는 변전소에 대하여만 수행하고 다이오드 정류기가 적용된 변전소에 대해서는 수행하지 않는다.

$$\begin{bmatrix} a_{11} & \dots & \dots & a_{1i} & \dots & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & & \vdots & \ddots & & \vdots \\ \vdots & & & a_{i-1i} & & & \vdots \\ a_{i1} & \dots & a_{ii-1} & a_{ii} & a_{ii+1} & \dots & a_{in} \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ \vdots & & & a_{i+1i} & & & \vdots \\ \vdots & & & \vdots & & & \vdots \\ a_{n1} & \dots & \dots & a_{ni} & \dots & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ \vdots \\ x_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_1 \\ \vdots \\ \vdots \\ y_i \\ \vdots \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} a_{11} - a_{1i}a_{i1} \cdots a_{1i-1} - a_{1i}a_{ii-1} & \frac{a_{1i}}{a_{ii}} & a_{1i+1} - a_{1i}a_{ii+1} \cdots a_{1n} - a_{1i}a_{in} \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ \vdots & \frac{a_{i-1i}}{a_{ii}} & \vdots \\ -\frac{a_{i1}}{a_{ii}} \cdots -\frac{a_{ii-1}}{a_{ii}} & \frac{1}{a_{ii}} & -\frac{a_{ii+1}}{a_{ii}} \cdots -\frac{a_{in}}{a_{ii}} \\ \vdots & \frac{a_{i+1i}}{a_{ii}} & \vdots \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ a_{ni} - a_{ni}a_{in} \cdots a_{ni-1} - a_{ni}a_{ii-1} & \frac{a_{ni}}{a_{ii}} & a_{ni+1} - a_{ni}a_{ii+1} \cdots a_{nn} - a_{ni}a_{in} \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ \vdots \\ y_1 \\ \vdots \\ x_n \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ \vdots \\ x_i \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix} \quad (2)$$

- 여기서, NSUB : 변전소의 수
- V_i : i번째 변전소의 가선전압
- V_{NL} : 다이오드 정류기 기준 무부하전압
- V_{SV} : PWM 정류기의 공급전압
- V_{RV} : PWM 정류기의 회생전압
- STATEi : i번째 변전소의 동작 모드(공급=1, 회생=0)
- I_i : i번째 변전소 공급전류('+'=공급, '-'=회생)
- ITERi : i번째 변전소에 의한 반복계산 필요 여부

'Part C'는 해석 결과의 내부 검증 과정이다. 즉, 변전소 가선 전압과 공급전류가 동작모드와 일치하는지를 검토하여 일치하지 않는 변전소를 검출하는 모듈이다. 이 과정을 통해 공급전압 상태에서 회생전류를 흡수하거나, 회생전압 상태에서 부하전류를 공급하는 변전소의 존재여부를 검출하고 해당 변전소의 동작모드를 전환하는 데에 목적이 있다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘과 기존 알고리즘의 차이점을 그림 4에 나타내었다. PWM 정류기의 적용에 의해 변수로 취급되던 변전소 가선전압은 상수화되고 이를 대신하여 PWM 정류기를 통해 공급되는 추가적인 전류를 변수로 취급하여 계산하는 것이 본 알고리즘의 가장 큰 특징이다. 또한, 단순히 시스템 노드의 전압 해석이 목적이 아닌, 변전소 회생전력 산정이 해석의 결과물로 제시됨에 따라 토폴로지가 변화한 직류도시철도 시스템의 해석에 부합되는 출력을 제시하고 있다.

4. 사례 연구

본 연구에서는 전압제어가 가능한 PWM 정류기의 해석 알고리즘을 제안하였고, 이 알고리즘의 효용성을 검토하기 위하여 기존의 다이오드와 정류기 대비 PWM 정류기 설치에 따른 효과를 분석하였다. 대상 노선은 수도권의 도시철도 한 노선을 대상으로 분석한다. 해당 노선을 대상으로 변전소 공급전력/회생전력, 가선 전압 변동률, PWM 정류기 출력전압을 비교 분석하였다.

4.1 사례연구 대상 시스템 및 열차 운행 조건

본 연구에서는 제안한 알고리즘의 효용성 검토를 위하여 수도권 지하철 특정 노선에 대한 전력해석을 수행하였다. 표 1은 해당 노선의 46개 역과 15개 변전소를 나타낸 것이다. 표 1과 같이 15개의 전철변전소가 설치된 노선에서 최소 시격 180초의 열차 운행조건으로 조류계산을 수행하였다. 즉, 상·하행 각 25대의 차량이 운행하는 조건이다.

4.2 모의 시나리오

PWM 정류기의 급전시스템 적용으로 기존 다이오드 정류기를 적용했을 때와 비교하여 급전시스템의 성능 개선 여부를 제안한

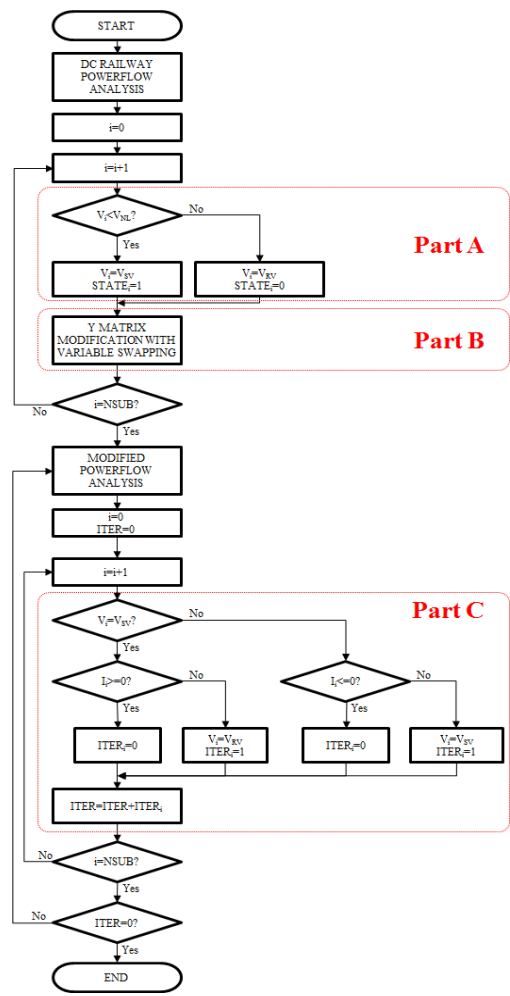


그림 3 PWM 정류기를 고려한 도시철도 전력해석 알고리즘
 Fig. 3 DC railway analysis algorithm considering PWM rectifier

표 1 대상 시스템의 정거장 및 변전소 위치

Table 1 Station and Substation location for case studies

역명	위치	역명	위치	역명	위치
A1	2,000	A17	18,216	A33(Sub11)	34,325
A2	2,900	A18	19,764	A34	35,235
A3(Sub1)	3,611	A19(Sub6)	20,484	A35	36,444
A4	4,839	A20	22,184	A36(Sub12)	38,350
A5	6,178	A21(Sub7)	23,084	A37	39,046
A6(Sub2)	7,201	A22	24,202	A38(Sub13)	40,400
A7	8,392	A23(Sub8)	25,084	A39	42,235
A8	9,479	A24	25,764	A40(Sub14)	43,519
A9(Sub3)	10,584	A25	26,975	A41	44,318
A10	11,676	A26	28,339	A42	45,119
A11	12,979	A27(Sub9)	29,200	A43	45,976
A12(Sub4)	13,805	A28	30,030	A44(Sub15)	46,903
A13	14,706	A29	30,913	A45	47,993
A14	16,057	A30	31,816	A46	49,388
A15	16,497	A31(Sub10)	32,826		
A16(Sub5)	17,508	A32	33,585		

표 2 모의 시나리오 적용 조건

Table 2 Cases for power flow

구분	case 1	case 2	case 3
정류기 종류	다이오드	PWM	PWM
무부하 기준전압 [V]	1650.0		
PWM 정류기 공급전압 제어기준 [V]	-	1520.0	1620.0
PWM 정류기 회생전압 [V]	-	1550.0	1650.0

조류계산 알고리즘으로 검토하고자 한다. 이를 위하여 기존 다이오드 정류기에 대한 조류 계산인 Case 1의 결과를 기준으로 PWM 정류기를 적용했을 때의 전차선 전압 변동률, 최대 전차선 전압, 최소 전차선 전압, 최대 순시전력, 최소 순시 전력, 평균 전력, 공급 전력량, 회생 전력량, 회생율 등을 비교하였다. PWM 정류기를 적용한 Case는 2가지로서 Case 1은 표 2에서 보인 바와 같이 PWM 정류기의 공급전압 제어기준이 1,520[V]일 때이다. 즉, 그림 1의 그래프에서 1사분면에 보인 전차선전압이 1,520[V]인 것이다. Case 2는 다이오드 정류기의 무부하 전압만큼 PWM 정류기의 제어 목표 전압을 상향 시킨 경우이다.

4.3 모의 결과

본 논문에서 제안한 PWM 정류기가 적용된 직류급전시스템의 조류계산 알고리즘을 바탕으로 특정 지하철 노선에 적용하여 앞

표 3 Case 1의 해석 결과

Table 3 Simulation results of case 1

변전소	최대전압 [V]	최소전압 [V]	전압변동률 [%]	최대전력 [kW]	공급전력량 [kWh]
Sub 1	1772.44	1402.14	22.44	13.84	142.16
Sub 2	1736.46	1497.97	14.45	8.49	107.22
Sub 3	1705.98	1519.84	11.28	7.27	104.22
Sub 4	1737.68	1470.75	16.18	10.01	121.01
Sub 5	1752.70	1423.60	19.95	12.64	140.16
Sub 6	1689.97	1494.67	11.84	8.67	94.61
Sub 7	1697.23	1533.40	9.93	6.51	87.36
Sub 8	1691.62	1533.60	9.58	6.50	92.19
Sub 9	1760.29	1442.21	19.28	11.60	118.95
Sub 10	1800.06	1406.98	23.82	13.57	144.60
Sub 11	1793.89	1416.04	22.90	13.06	145.49
Sub 12	1717.28	1514.14	12.31	7.58	114.57
Sub 13	1704.82	1548.54	9.47	5.66	92.66
Sub 14	1721.93	1522.70	12.07	7.11	109.39
Sub 15	1779.85	1423.60	21.59	12.64	148.82
Total			15.81		1763.41

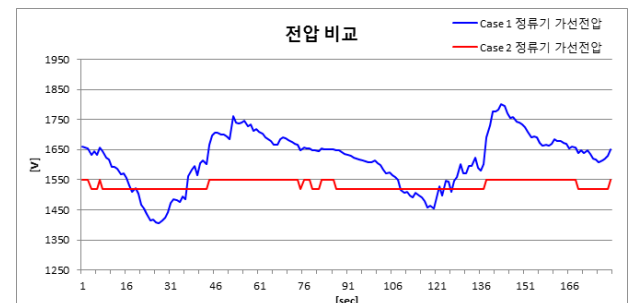


그림 4 case 1과 case 2와의 전압비교

Fig. 4 Voltage comparison of case 1 and 2

서 선정된 case들을 모의하였다.

최대 운전 시격 조건(180초 시격)에서 전체 노선에 대하여 180초 동안 모의한 결과, 다이오드 정류기를 적용한 경우, 변전소 공급전압은 최대 변동률은 23.82%(Sub 10)에서 최소 9.45%(Sub 13)로 나타났으며, 15개 변전소에서 1.763MWh의 에너지가 소비되었음을 알 수 있다. Case 1에 대한 각 변전소의 소비전력과 순시전력은 다음과 같다.

PWM 정류기를 적용하여 공급전압 제어 기준을 1,520[V], 회생 전압 1,550[V]인 case 2 경우 모의 계산 결과를 표 4에 나타내었다. 동일한 열차 시격 조건에서 모의한 결과 변전소 출력단의 전압은 급전전압(1,520V) 또는 회생전압(1,550V) 둘 중 하나로 운전하기 때문에 모든 변전소에 대하여 전압 변동율은 1.94%가 된다. 15개 변전소에서 2.233[MWh]의 에너지 공급과 0.765

표 4 Case 2의 해석 결과

Table 4 Simulation results of case 2

변전소	최대전압 [V]	최소전압 [V]	전압변동률 [%]	최대전력 [kW]	최소전력 [kW]	공급전력량 [kWh]	회생전력 [kWh]	순공급전력량 [kWh]	회생율 [%]	공급전력 [% case1]
Sub 1	1550	1520	1.94	22.00	-10.67	196.76	-67.15	129.61	34.13	91.17
Sub 2	1550	1520	1.94	12.56	-7.49	127.68	-42.63	85.05	33.38	79.33
Sub 3	1550	1520	1.94	10.14	-6.32	126.06	-37.57	88.49	29.80	84.90
Sub 4	1550	1520	1.94	15.72	-7.87	148.78	-39.06	109.71	26.26	90.66
Sub 5	1550	1520	1.94	22.44	-10.40	232.96	-89.74	143.22	38.52	102.18
Sub 6	1550	1520	1.94	6.98	-5.04	112.82	-36.87	75.96	32.68	80.29
Sub 7	1550	1520	1.94	8.93	-5.46	98.56	-33.35	65.21	33.84	74.65
Sub 8	1550	1520	1.94	11.95	-5.86	123.84	-39.02	84.82	31.51	92.00
Sub 9	1550	1520	1.94	18.24	-7.79	138.43	-29.94	108.49	21.63	91.21
Sub 10	1550	1520	1.94	18.38	-10.19	185.92	-78.11	107.81	42.01	74.56
Sub 11	1550	1520	1.94	17.23	-11.22	180.48	-82.49	97.99	45.71	67.35
Sub 12	1550	1520	1.94	12.90	-7.72	151.26	-41.11	110.15	27.18	96.14
Sub 13	1550	1520	1.94	6.95	-6.23	77.25	-38.50	38.75	49.84	41.82
Sub 14	1550	1520	1.94	9.74	-5.82	135.77	-44.51	91.26	32.78	83.43
Sub 15	1550	1520	1.94	17.95	-9.85	196.53	-64.51	132.02	32.83	88.71
Total			1.94			2233.09	-764.55	1468.54	34.14	82.56

[MWh]의 회생에너지, 도합 1.469[MWh]의 에너지가 소비되었음을 알 수 있다. case 1 대비 87.56%의 에너지 공급이 이루어졌음을 알 수 있다. case 2에 대한 각 변전소의 소비전력과 순시전력은 표 4와 같다.

그림 4는 case 1과 case 2의 변전소 공급전압을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 case 1의 다이오드 정류기는 부하의 증가와 함께 전압 강하 특성을 보이고 있으며, case 2의 PWM 정류기는 정전압 제어 특성에 의해 전압변동이 거의 없는 모의 결과를 보이고 있다.

공급전압 제어 기준 1,620[V], 회생 전압 1,650[V]인 경우의 PWM 정류기를 고려한 모의 계산 결과를 표 5에 나타내었다.

case 1과 동일한 열차 시격 조건(180초)에서 모의한 결과 변전소 출력단의 전압은 급전전압(1,620V) 또는 회생전압(1,650V) 둘 중 하나로 운전하기 때문에 모든 변전소에 대하여 전압 변동율은 1.82%가 된다. 15개 변전소에서 2,193[MWh]의 에너지 공급과 0.768[MWh]의 회생에너지, 도합 1.424[MWh]의 에너지가 소비되었음을 알 수 있다. case 1 대비 80.09%의 에너지 공급이 이루어졌다.

그림 5는 case 1과 case 3의 변전소 공급전압을 비교한 것이다. 그림에서 보듯이 case 1의 다이오드 정류기는 부하의 증가와 함께 전압 강하 특성을 보이고 있으며, case 3의 PWM 정류기는 정전압 제어 특성에 의해 전압변동이 거의없는 모의 결과를 보이고 있다. 이러한 전압 공급 특성이 전압 변동률의 차이의 원인이다.

case 1과 case 3을 비교한 결과를 표 5에 나타내었다. 표 3은 각 시나리오의 모의 결과를 비교한 것이다. 다이오드 정류기에 비해 PWM 정류기를 적용하는 경우, 회생전압 비설정시 약 절반 수준으로 전압 변동율이 낮아짐을 볼 수 있으며, 회생에너지의 활용 재고를 통한 소비 에너지가 80% 수준으로 낮아짐을 볼 수



그림 5 case 1과 case 3과의 전압비교

Fig. 5 Voltage comparison of case 1 and 3

있다. Case 2와 3의 경우, 전압레벨만 다른 경우인데 보다 낮은 전압으로 설정함에 따른 손실분 만큼의 소비전력량의 차이가 있음을 볼 수 있다.

5. 결 론

기존 다이오드 정류기의 대체재로서의 PWM 정류기는 정전압 제어로 인하여 전압강하를 감소시켜 변전소간 급전거리가 길게 할 수 있고, 이로 인하여 변전소 구축 비용의 절감이 기대된다. 또한, 역방향 운전이 가능하여 자체적으로 회생전력을 이용할 수 있는 장점이 있다.

이와 같은 장점을 가진 PWM 정류기를 실제 급전시스템에 적용하기 위해서는 기존 다이오드 정류기와 함께 정확한 성능 평가를 할 수 있는 조류계산 알고리즘이 필요하고, 이를 바탕으로 계

표 5 Case 3의 해석 결과

Table 5 Simulation results of case 3

변전소	최대전압 [V]	최소전압 [V]	전압변동률 [%]	최대전력 [kW]	최소전력 [kW]	공급전력량 [kWh]	회생전력 [kWh]	순공급전력량 [kWh]	회생율 [%]	공급전력 [% case1]
Sub 1	1650	1620	1.82	21.41	-10.94	192.76	-67.42	125.34	34.97	88.17
Sub 2	1650	1620	1.82	12.34	-7.60	125.12	-42.23	82.89	33.75	77.31
Sub 3	1650	1620	1.82	9.99	-6.41	122.81	-37.37	85.43	30.43	81.97
Sub 4	1650	1620	1.82	15.37	-7.99	146.14	-39.26	106.88	26.87	88.32
Sub 5	1650	1620	1.82	21.84	-10.64	228.12	-89.92	138.20	39.42	98.60
Sub 6	1650	1620	1.82	6.90	-5.19	111.34	-36.66	74.69	32.92	78.95
Sub 7	1650	1620	1.82	8.80	-5.61	97.15	-33.62	63.53	34.60	72.72
Sub 8	1650	1620	1.82	11.71	-5.87	121.14	-38.67	82.47	31.92	89.46
Sub 9	1650	1620	1.82	17.81	-7.87	135.54	-30.55	105.00	22.54	88.27
Sub 10	1650	1620	1.82	17.93	-10.41	183.07	-79.10	103.97	43.21	71.90
Sub 11	1650	1620	1.82	16.83	-11.51	178.12	-83.89	94.23	47.10	64.77
Sub 12	1650	1620	1.82	12.64	-7.85	150.83	-40.80	110.03	27.05	96.05
Sub 13	1650	1620	1.82	6.85	-6.22	75.03	-39.89	35.15	53.16	37.93
Sub 14	1650	1620	1.82	9.59	-5.81	132.94	-44.10	88.84	33.17	81.22
Sub 15	1650	1620	1.82	17.48	-10.08	192.71	-65.16	127.55	33.81	85.71
Total			1.82			2192.83	-768.63	1424.20	34.99	80.09

획된 또는 운행중인 전동차 부하에 적합한 용량의 정류기 설계 및 구축이 가능할 것이다.

이를 위해 본 논문에서는 PWM 정류기를 채용한 직류급전시스템의 조류계산을 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 PWM 정류기의 공급전압의 정전압 제어 및 회생전력의 변환 등의 특성을 반영하기 위하여 변수 교환 기법을 이용하였다. 제안한 알고리즘과 기존 개발한 다이오드 정류기가 적용된 직류급전시스템의 조류계산 알고리즘을 활용하여 동일한 선로에 대하여 모의 해석을 수행하였다. 그 결과 전압강하 특성에서 PWM 정류기가 우수함을 알 수 있었다.

향후, 제안한 PWM 정류기를 포함한 급전시스템 해석 방법은 도시철도의 안정적인 전력공급을 위한 주요 톨로 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원 주요사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

References

[1] Joorak Kim, Kijun Park, Chang-reung Park, Eun-Sang Choo, Jun-Young Lee, "Analysis on Voltage and Cost of Substation with PWM Rectifier in DC Traction Power Supply System" The Transactions of the KIEE, Vol. 64, No. 4, pp. 640-645, 2015

[2] Joorak Kim, Chang-reung Park, Kijun Park, Joo-Uk Kim, "A Study on DC Traction Power Supply System

Using PWM Converter", J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng. Vol. 29, No. 4, pp. 250-254, 2016.

[3] Andrzej M. Trzynadlowski, 'Introduction to Modern Power Electronics', John Wiley & Sons, Inc., 2010

[4] J. P. Agrawal, Power Electronic Systems : Theory and Design, Prentice Hall, 2001.

[5] B. H. Kwon, B. D. Min, "PWM Rectifier Using IGBTs", Trans. KIEE, Vol. 42, No. 6, pp. 18-27, 1993.

[6] K. S. Lee, S. C. Oh, "A Study on PWM(Pulse Width Modulation) Converter Using IGBT", 2005 KIPE Autumn conference Proceedings, pp. 114-116, 2005.

[7] H. Lee, H. Lee, C. Lee, G. Jang, G. Kim, "Energy Storage Application Strategy on DC Electric Railroad System using a Novel Railroad Analysis Algorithm," Journal of Electrical Engineering and Technology, vol. 5, No. 2, pp. 228-238, June 2010

저 자 소 개



김 주 락 (Joo-Rak Kim)

1974년 3월 22일생. 1997년 홍익대 전자전기공학부 졸업. 1999년 동대학원 전기제어공학과 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학박사). 2000년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원
E-mail : jrkim@krri.re.kr