

DC 전기철도변전소의 정류기용량산정

정상기* 이병송 정락교 박성혁
한국철도기술연구원

이승재
명지대학교

Determination of Rectifier Current Rating
for DC Traction Power Substation

S.G.Chung, B.S.Lee R.K.Jeong S.H.Park
Korea Railroad Research Institute

S.J.Lee
Myongji University

Abstract - DC 전기철도 변전소의 정류기 용량산정은 온도상승 제한에 따른 전류정격 결정을 뜻한다. 본 논문에서는 온도등가전력의 개념을 도입하여 정류기의 rms 전류용량을 결정하는 이론적 방법을 제시한다. 또한 기존의 수계산방법과 컴퓨터 시뮬레이션 방법의 비교 검토를 통하여 개선점을 제시하였다.

1. 서 론

전기철도의 전력공급시스템 설계에서 가장 먼저 선정되는 요소는 변전소의 위치와 변전소의 용량이다. 또한 이 두 가지는 서로 연관 관계에 있으며 전력공급시스템의 성능을 결정짓는 가장 중요한 두 가지 요소이다. 이 중에서 본 논문에서는 변전소의 용량을 말해주는 정류기 용량산정 방법을 다룬다. 이제까지 정류기 용량 선정에는 경험적 기준에 의거한 수계산 방법이 이용되고 있으나 이는 이론적 근거가 미약하고 오류가 지적되고 있으나 [2] 경험적 기준의 한계를 정확히 인식하고 사용하면 유용성이 있다. 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법은 정확한 자료만 제공된다면 매우 좋은 방법이다. 그러나 어느 방법이든 가장 중요한 것은 적절한 적용 데이터의 선정이다.

정확한 데이터의 선정을 위해 본 논문에서는 '온도등가전력'이라는 개념을 도입하였다. 온도등가전력이란 정전압(V, DC) 계통에서 변화하는 전류(i)가 발생시키는 열량($i^2 \cdot rt$)과 동일한 열량을 일정한(constant) 전류(I)가 발생시킬 경우 그 일정한 전류에 의한 전력($V \cdot I$)을 의미한다. 본문에서는 이 두 가지 방법을 적용하여(??) 철도기술연구원에서 수행중인 경량전철기술개발사업의 목표노선을 예로서 정류기용량 선정방법을 제시한다.

2. 본 론

2.1 정류기의 표준정격

표1 및 표2에는 각각 IEC146-1-1 및 JEC-178에서 정의된 정류기 표준정격 중 전기철도변전소에서 사용되는 표준정격을 보여준다. 표준정격에서 말하는 정격 출력전류는 일정한 전류가 흘러서 온도상승 후 온도평형을 이룬 후에도 계속적으로 사용할 수 있는 전류를 말하고 정격출력 외의 전류는 정격전류가 흘러서 온도평형을 이룬 후에 가할 수 있는 전류 및 시간을 나타낸다. 여기서 유의하여야 할 사항은 표준정격은 kw에 대한 규격이 아니라 전류(A)의 규격이고 그것도 일정한(constant) 전류에 대한 규격이라는 것이다. 그러나 전기철도 부하는 일정하지 않고 항상 변하기 때문에 규격에서 의미하는 일정한 전류로 변환한 후에 적용하여야 한다. 전력 기기에 있어서의 전류 상승에 대한 제한은 온도상승에 대한 제한이기 때문에 변환된 전류 값이 동일한 온도상승 효과를 나타내도록 하기 위하여는 rms 전류값을 사용하여야 한다. 따라서 표준규격은 rms 전류규격으로 주어져야 한다.

표_1 IEC 146-1-1 표준정격

Duty Class	% Rated 출력 current
V	100% 연속
	150% 2 시간
	200% 1 분
VI	100% 연속
	150% 2 시간
	300% 1 분

표_2 JEC-178 표준정격

정격의 종류	부하조건(% 정격출력전류)
D	100% 연속
	150% 2 시간
	300% 1 분
E	100% 연속
	120% 2 시간 300% 1 분

2.2 온도등가전력의 개념

그림_1의 회로에서 가변저항의 값이 매초 100Ω, 40Ω, 20Ω으로 변한다고 가정하면 3초간의 회로 데이터는 표_3과 같이 된다. 여기서 전력량 624.24w·sec를 이용하여 전류값을 구하면

$$I = \frac{624.24w \cdot sec}{100v \times 3sec} = 2.0808[A] \text{가 되고 이 값으로부터}$$

열량을 계산하면 $Q = (2.0808A)^2 \times 10\Omega \times 3sec = 129.8919[joule]$ 이 되어 표_3의 159.37[joule]과 서로 다르다. 이 오류를 피하기 위해서는 실제의 전력량 값을 이용하지 말고 I_rms 값을 이용하여 온도등가전력량 값을 구한다.(식(1))

$$\text{온도등가전력량} = I_{rms} \times V_{nominal} \times (\text{시간}) \text{ --- (1)}$$

$$\text{표_3에서 } I_{rms} = \sqrt{\frac{0.9091^2 + 2.0^2 + 3.3333^2}{3}} =$$

2.3049[A]가 되고

온도등가전력량은 식(1)에 의해 691.47w·sec가 된다. 발생열량 Q는

$$Q = I^2 \cdot r \cdot t = \frac{691.47^2}{100} A \cdot (10\Omega) \cdot (3sec) = 159.373joule$$

로서 표_3과 일치한다. TPS(Train Performance Simulation)에서 주어지는 전력량(예에서는 624.24w·sec)에는 정류기에서의 발생 열량(예에서는 10Ω)에 대한 정보가 없다.

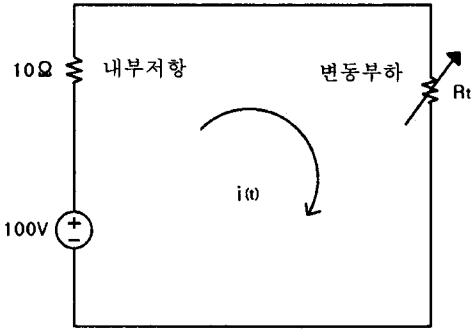


그림 1 변동부하 회로 예

표 3 그림_1의 회로 데이터

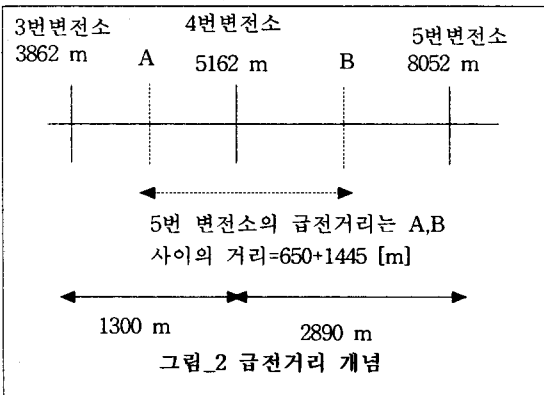
시간(sec)	Rt(Ω)	순시전류 [A]	전력 w · sec	열량 Joule
1	100	0.9091	90.91	8.2646
2	40	2.0	200.	40.0
3	20	3.3333	333.33	111.1089
합			624.24	159.373

2.3 수계산에 의한 정류기 용량산정

정류기 용량산정을 위하여 필요한 자료는 1시간 최대 전력사용량과 순시 최대전류 값이며 이것은 각각 정류기의 연속정격, 2시간 정격 및 1분 정격전류 값과 비교된다. 따라서 수계산에 의한 방법이나 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 방법 모두 그 과정은 이 2 가지의 값을 구하는 것이다.

2.3.1 변전소의 급전거리

DC 급전시스템은 일반적으로 병렬로 운전되므로 인접 변전소와 부하를 분담한다. 만일 변전소 내부저항을 같다고 보면 분담율도 같아지므로 변전소 사이의 거리를 반분하여 한쪽을 한 변전소에서 전담한다고 보는 것이다. 그러므로 어떤 변전소의 급전거리(L1)는 좌우인접변전소와의 거리를 각각 반분하여 합한 거리를 말한다. 목표노선의 4번 변전소의 급전거리는 그림2에서 보듯이 2095m 이다.



그림_2 급전거리 개념

2.3.2 전력소비율: R

전력소비율(R)은 열차가 시간당 최대전력을 사용할 때의 전력소비량[kwh]을 주행구간[km] 및 열차중량[톤]으로 나눈 값을 말한다 (식(2)).

$$R = \frac{\text{소비전력량 [kwh]}}{\text{주행구간 [km]} \times \text{열차중량 [톤]}} \quad \text{--- (2)}$$

$$\text{소비전력량} = \text{역행전력량} + \text{보조기기소비전력량} - \text{회생전력량} \times \text{회생전력이용율} \quad \text{--- (3)}$$

식(2),(3)에서 필요한 데이터는 일반적으로 차량 제작사로부터의 TPS(Train Performance Simulation) 결과에서 얻어진다. 회생이용율은 시스템에 따라 달라지나 50%의 값이 많이 적용된다. 열차중량은 승객이 최대일 경우의 열차무게를 적용한다. 그러나 여기서 자료의 적용에 있어서 매우 유의하여야 할 점은 2.2항에서도 설명되었듯이 실제전력량을 사용하지 말고 온도상승에 대해서 동일한 효과를 주는 온도등가전력량을 사용해야 한다는 것이다. 그것은 전력량을 이용하여 그것을 전압으로 나누어 전류를 구하면 그 전류는 주행시간동안의 산술평균전류이며(식(4)) rms 전류 값이 아니기 때문이다.

$$\text{전력량} = I_{\text{average}} \times V_{\text{nominal}} \times (\text{시간}) \quad \text{--- (4)}$$

목표노선에 대해서 TPS를 돌린 결과(표_4)를 예로서 다시 설명해 보면, 식(3)의 역행전력량으로서 이용되는 데이터는 표_4의 ④에 나온 142.6kwh가 아니고 ⑤에 있는 I_{rms}=467.2A를 이용해 식 (1)에 의해 나오는 온도등가전력량을 적용해야 한다. 같은 방법으로 회생전력량도 구하면 표 4와 같이 정리된다. 표 4에서 보듯이 역행의 경우 온도등가전력량이 실제전력량보다 74% 더 크다. 전류의 변화가 심할수록 %차이는 더 커진다. 목표노선에 대해 온도등가전력량을 이용하여 전력소비율을 계산하면

$$R1 = \frac{204.75\text{kwh}}{21\text{km} \times 76\text{톤}} = 0.1283 \text{ [kwh/km/톤]} \text{ 이 되고}$$

실제의 전력을 이용하여 전력소비율을 구하면

$$R2 = \frac{139.75\text{kwh}}{21\text{km} \times 76\text{톤}} = 0.0876 \text{ [kwh/km/톤]} \text{ 이 된다.}$$

표 4 목표노선의 TPS 결과

2. -----	TPS 결과
2.1 -----	요약 보고
①	Total travel distance=21000[m]
②	Total traveling time= 2543.7[s]
③	Scheduled Speed= 29.7[km/h]
④	Total energy for accelerating=142.6[kwh]
⑤	I _{rms} for accelerating=467.2[A]
⑥	I _{ave} for accelerating=269.0[A]
⑦	Total energy from regenerative braking= 48.1[kwh]
⑧	I _{rms} regenerated from braking=241.8[A]
⑨	I _{ave} regenerated from braking=-90.7[A]
⑩	Total energy for train auxiliaries= 21.2[kwh]
⑪	Peak current=1670.3[A] at location 11685[m]

표 5 실제전력량과 등가전력량의 비교

구 분	실제전력량 [kwh]	온도등가전력량 [kwh]	차이(%)
역행전력량 [kwh]	142.6	247.6	74
회생전력량 [kwh]	48.1	128.1	166
보조기기소비 전력량(kwh)	21.2	21.2	0
소비전력량	139.75	204.75	47

2.3.3 1시간급전거리

1시간동안 변전소의 급전구간을 지나는 열차의 총 주행거리(L2)를 말한다. 최대전력을 구해야하므로 당연히 제일 짧은 시격을 적용한다.

$$L2 = \frac{60[\text{분}]}{\text{시격}[\text{분}]} \times \text{변전소급전거리}(L1)[\text{km/hr}] - (6)$$

목표노선의 경우에는 $L2 = \frac{60}{2} \times 2.095 = 62.85\text{km/hr}$ 이다

2.3.4 1시간최대전력

전력소비율이 단위길이, 단위무게당의 전력사용량이므로 1시간 최대전력(Y)은 전력소비율에 1시간급전거리와 열차의 무게를 곱하여 구할 수 있다.(식(7))
 $Y = \text{전력소비율}(R) \times 1\text{시간급전거리}(L2) [\text{kw}] \quad \text{--- (7)}$
 목표노선 5번 변전소의 경우에는 등가전력량을 적용할 경우 $Y1 = 0.1283 \times 62.85 \times 76 = 613 [\text{kw}]$ 이 되고 실제전력을 적용한 경우는 $Y2 = 0.0876 \times 62.85 \times 76 = 418 [\text{kw}]$ 이 된다.

2.3.5 순시최대전력

순시최대전력(Z)은 식(8), (9)의 경험식에 의해 구하고 있다. 식(8)에서 계수 C는 통계적으로 순시최대전류의 평방근에 비례하는 것으로 되어 있으나 차량의 구동특성에 따라 다르므로 최근의 VVVF 차량에 대해서는 식(9)의 계수 1.7을 재검토 할 필요가 있다.

$$Z = Y + \sqrt{Y} \quad \text{--- (8)}$$

$$C = 1.7 \times \sqrt{I_{max}} \quad \text{--- (9)}$$

목표노선의 경우는 등가전력량을 적용할 경우

$$C = 1.7 \times \sqrt{1670} = 69.5$$

$Z1 = 613 + 69.5 \sqrt{613} = 2334\text{kw}$ 이고 실제전력량을 적용할 경우

$$Z2 = 418 + 69.5 \sqrt{418} = 1839\text{kw}$$
 이다.

2.4 컴퓨터시뮬레이션에 의한 정류기 용량산정

2.4.1 1시간최대전력

4번 변전소에 대한 시뮬레이션 결과는 표_5와 같다. 수작업의 경우와 마찬가지로 1 시간최대전력(Y)는 ②항에서의 581.437kw를 적용하지 않고 ③항의 I_rms 값을 이용한 온도등가전력을 적용하여야 한다. 목표노선의 경우 $Y = 980.69A \times 750V = 736\text{kw}$ 이다.

표 6 4번 변전소에 대한 컴퓨터시뮬레이션 결과

For substation Sub_4	
①	* Max. demand of 1284.77[kw] occurs at time 1836.0
②	* Average demand is 581.43[kw] from 1800.0[sec] to 3600.0[sec]
③	* I_rms is 980.69[A] from 1800.0[sec] to 3600.0[sec]
④	* Max. load current is 1952.46[A] at time 1836.0[sec]
⑤	* Max. up_feeder current of 1770.90[A] flows at time 1808.0
⑥	* Max. down_feeder curr. of 1850.79[A] flows at time 1835.0

2.3.2 순시최대전력

순시최대전력도 표_5 ①항의 Max. Demand인 1284.77kw를 적용하는 것이 아니고 ④항의 최대전류 값 1952.46A를 이용해 구한 전력을 적용해야한다. 그 이유는 궁극적인 목표가 최대 kw값이 아니고 최대전류 값이기 때문이다. 이 차이는 변전소의 출력단 전압이 내부전압강하로 인하여 정격전압보다 작기 때문이다. 목표노선의 경우 $Z = 1952.46A \times 750V = 1464\text{kw}$ 이다.

2.5 두 방법의 비교 검토

각각의 방법에 의한 결과를 표_6에서 비교하였다. 먼저 1시간 최대전력의 계산에서 수작업의 결과가 컴퓨터시뮬레이션의 결과 보다 작은 가장 큰 이유는 수 작업시에는 가선의 전압이 항상 정격전압으로 가정되나 시뮬레이션에서는 변전소내부저항에 의한 전압강하가 계산되기 때문이다. 따라서 최대부하의 경우 부하전류는 약 20%의 차이를 보이는 것은 예상되는 일이다. 순시최대전력의 경우, 수작업의 경우는 순시값과 1시간 값이 약 4배의 차이를 보이나 컴퓨터 시뮬레이션의 경우는 2배의 차이에 불과하다. 그 이유는 식(9)가 직류모터를 저항기 동하고 회생제동이 아닌 저항제동의 차량에 대해서 만들어진 통계 식이기 때문인 것으로 판단된다. 다시 말하면 식(9)에서 계수 1.7은 VVVF 차량에 회생제동을 이용하는 경우에는 너무 크다. 그 값은 시뮬레이션 결과를 역산하면(1시간 값과 순시값의 차이가 2배정도 되게) 1.0 근처가 되나 실제 오랜 운행기록에 의하여 검토될 필요가 있다. 결론적으로는 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 예측이 가장 정확하며 반드시 수행되어야 한다. 그러나 설계의 단계에서 그다지 큰 정확도가 요구되지 않을 경우나 개략적인 용량의 타당성 검토등에는 수작업에 의한 방법도 많은 잇점이 있다. 다만 정확도에 한계가 있음을 숙지할 필요가 있다.

표 7 각 방법의 결과 비교

항 목	수작업_1	수작업_2 등가전력량 적용	컴퓨터 시뮬레이션	% 차이 (수작업1)
1시간최대 전력(Y) kw	418	613	736	20(76)
순시 최대 전력(Z) kw	1839	2334	1464	37(21)
1시간전력 과 순시전 력의 비	4.4	3.8	2.0	

2.6 정류기용량선정 기준

IEC Duty Class VI의 표준정격을 적용할 경우는 1시간 최대전력이 정류기의 연속정격(100%)을 넘지 않고 순시최대전력의 120%가 정류기의 1분정격(300%)을 넘지 않게 선정하면 적절하다고 판단된다. 이상을 요약하면 식(10) 및 식(11)과 같다.
 1시간최대전력 < 정류기 연속정격 ---- (10)
 순시최대전력×1.2 < 정류기 1분정격 ----- (11)
 목표노선의 경우는 표7과 같다.

표 8 목표노선의 정류기 용량

	시뮬레이션 결과	정류기 최소용량	선정정격
1시간 최대전력	736kw	736kw	1000kw
순시최대전력 ×120%	1757kw	586kw	-

3. 결 론

정류기용량 계산시에는 반드시 실제전력량이 아닌 온도등가전력량을 계산하여 적용하여야 한다. 이것은 정확도의 문제라기보다는 방법의 타당성의 문제이다. 또한 설계회사가 서로 다른 방법으로 설계자료를 제시하면 평가나 해석이 매우 어려워지며 다른 시스템과의 협조도 어려워진다. 그러므로 도시철도 운영 및 설계기관은 통일된 설계지침을 제시하여야 된다고 판단된다.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국철도기술연구원, "경량전철시스템기술개발사업1차년도연구보고서 종합시스템엔지니어링" 18쪽~49쪽, 1999
- [2] 鎌原 今朝雄, "전력설비의 용량계산법" 일본철도전기기술협회, 1999