

운전패턴변화에 따른 고속전철용 견인전동기의 경량화설계에 관한 연구

A study on weight reduction design of induction motor for high speed train with driving patten variations

김근웅* 배동진** 윤종학*** 이기호**** 한성수*****

ABSTRACT

This paper presents an inverter-driven induction motor used as the traction motor for a high speed drive system that is required safety, reliability and performance and so on. In the respect of traction motor design, it is mainly showed the weight reduction inclination and characteristic investigation due to V/f driving pattern variation of inverter. Particularly, the reduction of V/f ratio pattern effects on the weight of traction motor and badly on the increase of phase current of traction motor in starting point. This method of weight reduction design have to be reached the decision with not only motor but also the consideration of inverter system because of the heat capacity, weight and material cost of inverter according to the increase of current.

1. 서론

철도차량의 고속운전에 있어서는 안정성과 고신뢰성 및 운전비 저감, 에너지의 효과적인 이용, 차량운영 및 보수유지비의 경감 등이 요구되고 있으며, 이러한 요구조건을 충족시킬 수 있는 가변속 추진시스템으로서 고효율, 고속스위칭 트랜지스터로 구성되어 있는 인버터와 정류자 전동기에 비해 출력당 낮은 질량비를 가지며 회전속도를 보다 높일 수 있는 3상유도전동기의 결합시스템이 프랑스, 독일, 일본 등의 기술선진국에서 널리 채택되고 있다.

이러한 가변속시스템에서 유도기를 구동하기 위한 인버터는 PWM과 6-STEP의 2가지 운전모드로

* 대우중공업 철차연구소 주임연구원, 비회원
** 현대중공업 중앙연구소 선임연구원, 비회원
*** 대우중공업 철차연구소 책임연구원, 비회원
**** 대우중공업 철차연구소 책임연구원, 비회원
***** 대우중공업 철차연구소 수석연구원, 비회원

구성되어 있으며, 일반적으로 PWM모드는 정토크운전영역에서 가변전압과 가변주파수를 전동기에 공급하고 일정자속을 유지하도록하며, 6-STEP모드는 정출력영역에서 주파수만 가변하여 전동기에 공급한다. [1] 그러나, 최근 고속전철용 가변속시스템에서는 PWM 모드를 정출력영역의 일부분까지 확장하여 운전하고 있으며, 이는 속도에 대한 전압의 비를 낮추는 것으로 자속의 감소량만큼 전동기 중량을 감소시킬 수 있는 장점이 있기 때문이다. 프랑스와 영국사이를 운행하는 고속전철 TMST의 가변속시스템이 대표적인 사례이다.

본 논문에서는 국내의 기술자립을 위해 추진하고 있는 한국형 고속전철기술개발사업의 일환인 고속전철용 견인전동기의 개발에 있어서 인버터의 V/f운전패턴변화에 따른 전동기 관점에서의 경량화설계 경향을 제시하고 특성을 고찰하는데 목적이 있다.

2. V/f패턴(Base Speed) 결정방법[2][3]

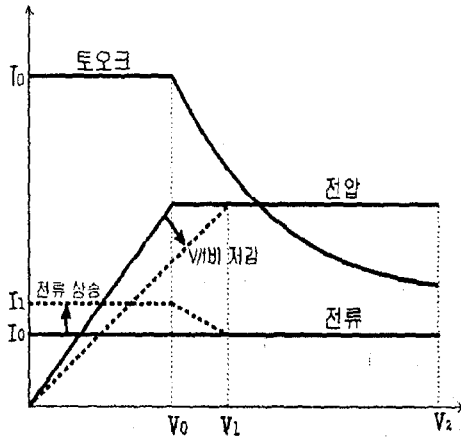


그림 1. 차량성능곡선

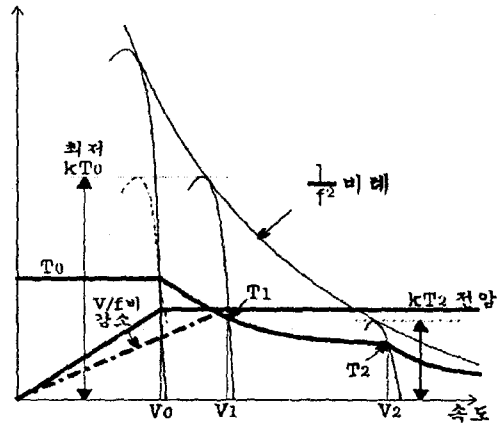


그림 2. 토크특성

그림 1과 같이 차량성능곡선이 주어진 경우 최대허용전류를 변경하므로써 여러가지 V/f선정이 가능하며, V/f패턴을 낮추면 자속량이 감소하여 철심단면적을 작게 할 수 있으므로 경량화가 가능하다. 그러나 기동토크가 부족하게 되어 기동전류를 증가시켜야 하므로 경량화 관점에서 본 경우 V/f의 한계가 있다. 기동전류를 증가시켜 V/f패턴을 변경하는 경우는 다음을 만족시켜야 한다.

첫째, 기동시 정격토크에 대한 최대토크의 여유를 확보해야 한다.

둘째, 인버터의 전류용량의 한계를 만족시켜야 한다.

이러한 조건에서 그림 2와 같이 기동전류를 증가시킨 V/f패턴의 속도 V_1 에서의 최대토크

T_{1max} 는 식(1)과 같이 속도 V_2 에 있어서의 토크 여유와 같은 정도의 여유분을, 기동 토크 T_0 에 대하여 가지면 된다.

$$T_{1\max} \geq kT_o \quad (1)$$

최대토크는 $1/v^2$ 에 비례하므로,

$$T_{1\max} = k(V_2/V_1)^2 T_2 \quad (2)$$

식(1)과 식(2)로부터,

$$V_1 \leq V_2 \times \sqrt{T_2/T_o} \quad (3)$$

정출력 영역에서는 $V_o T_o = V_2 T_2$ 이므로,

$$V_1 \leq \sqrt{V_o V_2} \quad (4)$$

3. 고속전철 차량조건 및 견인력곡선

표 1은 한국형고속전철의 시스템요구사항(안)[4]에 의해 작성된 차량운행조건이며 열차중량은 16량, 편성중중량은 630ton이다. 그림 3은 표 1의 조건에 의해 계산된 속도-견인력곡선을 나타낸 것으로 정토크종단속도는 129 km/h이다.

표 1. 차량운행조건

항 목	차량조건	항목	차량조건
최고 속도	350 km/h	가속여력 (최고속도)	0.045 m/s ²
차륜경	885 mm	기 동 시 점착한계	0.188
기어효율	0.975	기 어 비	2.012

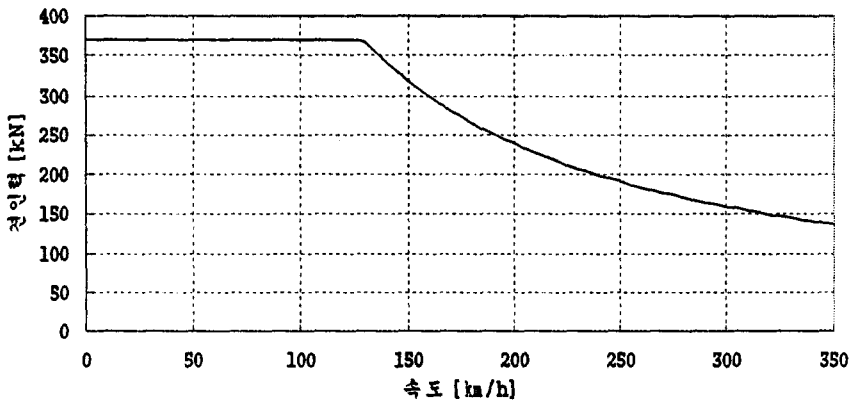


그림 3. 차량 속도-견인력 곡선(전동기 12대)

4. 운전패턴에 따른 전동기 경량화 설계

1) 설계조건

V/f운전패턴변화에 따른 경량화의 경향을 파악하기 위해 표 2와 같은 설계조건을 두었다.

표 2. 전동기 설계조건

항 목	설계조건					비 고
출력[kW]	1150					정출력영역
온도[℃]	150					
자속밀도[T]	고정자 Teeth	고정자 Yoke	회전자 Teeth	회전자 Yoke	공극	최대허용 자속밀도
	1.8	1.7	1.9	1.8	0.9	
전류밀도[A/mm ²]	고정자		회전자 Bar		End Ring	최대허용 전류밀도
	8		9		9.5	
고정자/회전자 슬롯수	60 / 74					
회전자 주위속도 [m/sec]	최대		95			고정자 내경 : 400[mm]
	설계		88.4			
권선피치	#1 ~ #13					
점적율[%]	51					
효율[%]	95					
역율[%]	89					
통풍구	고정자	φ 23 × 60개				
	회전자	φ 31.3 × 12개				

2) 전동기 설계

표 2의 설계조건과 그림 3의 정토오크종단속도($V_0 = 129 \text{ km/h}$)와 base speed(V_1)와의 비를 변화시키면서 설계수식 (5)~(16)에 의해 계산된다.

$$\cdot \text{입력 } KVA = \text{입력 } KW / (\text{COS} \phi \cdot \eta) \quad (5)$$

$$\cdot \text{전류 } I_1 = kVA \times 10^3 / \sqrt{3} \times V_L \quad (6)$$

$$\cdot \text{매극의용량 } S = kVA / p \text{ [kVA]} \quad (7)$$

$$\cdot \text{비용량} = S / (f \times 10^{-2}) \quad (8)$$

$$\cdot \text{자속 } \Phi = \Phi_o \left(\frac{S}{f \times 10^{-2}} \right)^{\frac{\gamma}{1+\gamma}} [\text{Wb}] \quad (9)$$

(여기서, $\gamma = 1.3$, $\Phi_o = 0.25 \times 10^{-2} [\text{Wb}]$)

$$\cdot \text{상당직렬턴수 } N_{ph} = \frac{V_L / \sqrt{3} \times 0.95}{4.44 K_w \phi f} \quad (10)$$

$$\cdot \text{전기장하 } AC = \frac{3 N_{ph} I_1 \times 2}{p} [A] \quad (11)$$

$$\cdot \tau L = \frac{\Phi \times 10^4}{\frac{2}{\pi} \times B_g} [cm^2] \quad (12)$$

(B_g 는 공극자속밀도)

$$\cdot \text{적층철심길이 } L = \frac{(\tau L)}{\tau} [cm] \quad (13)$$

$$\cdot \text{슬롯면적 } A_{s,r} = \frac{K}{S_f} [cm^2] \quad (14)$$

(S_f : 슬롯점적율, K : 슬롯당 도체단면적)

$$\cdot \text{teeth폭 } W_{k,tr} = \frac{SP \cdot B_g}{0.97 \cdot B_{d,e}} [cm] \quad (15)$$

$$\cdot \text{coreback길이 } h_{d,e} = \frac{\Phi / 2 \times 10^4}{0.97 \cdot B_{d,e} \cdot L} \quad (16)$$

($B_{d,e}$: 고정자, 회전자 core-back 자속밀도)

5. 전동기 해석 결과

전동기의 정토오크종단속도(V_0)에 대한 Base Speed(V_1)의 비를 점차적으로 증가시켜면서, 표 2의 전동기 설계조건에 만족시키는 전동기를 설계하였고, 그 해석 결과인 기동시 RMS 전류값과 중량비를 그림 4와 그림 5에 나타내었다. 단, 그림 4와 5에서는 경량화추세를 보기 위해 식(4)의 Base Speed 한계점을 고려하지 않았다.

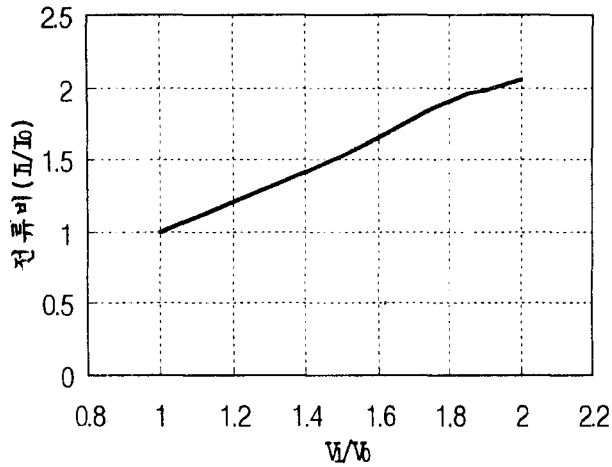


그림 4. V_1/V_0 비에 따른 전류비

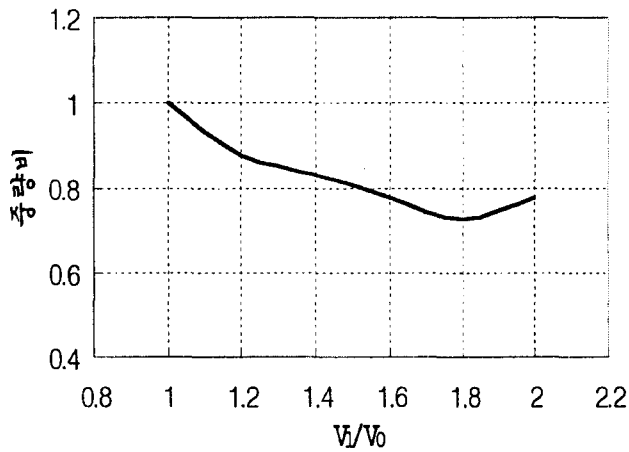


그림 5. V_1/V_0 비에 따른 중량비

그림 4에서는 V_1/V_0 의 증가에 따라 전동기 rms 전류가 증가하는 현상이 나타나며, 이는 정토크 구간에서의 전압감소에 따른 기동토크의 감소를 보상하기 위하여 전동기 rms 전류가 증가하기 때문이다. 기동시의 rms 전류의 증가는 인버터 전류용량의 증가를 동반하기 때문에, 인버터의 용량한계, 재료비, 열적능력, 중량 등의 경제성에 의해 제약받게 된다. 또한, Base Speed를 너무 크게 설정하면 정격토크와 최대토크의 여유가 감소하게 되어 실제로 정할 수 있는 rms 전류값의 상승은 한계가 존재한다.

그림 5는 V_1/V_0 의 증가에 따라 전동기 경량화 경향을 나타낸 것으로, Base Speed의 증가로 인하여 V/f 비가 낮게 설정이 되고 전동기의 자속량은 감소하는 결과를 가져오며, 결과적으로 철심의 단면적을 작게 설계할 수 있다. 그러나 V/f 비의 감소로 인한 전동기 경량화 설계에 대한 한계

는 rms 전류의 증가로 도체 단면적이 증가하고 기동토크의 부족으로 인하여 도체수가 감소하며 철심의 체적이 커지면서 전체의 중량이 다시 증가하는 현상이 발생한다.

다음은 2절의 'V/f패턴결정방법'에 의해서 V/f비의 감소전에 설계한 전동기와 V/f비를 Base Speed의 한계점(212.5km/h)까지 감소시켜 설계한 전동기의 정토크 종단지점에서의 특성을 비교한다. 식(4)에 의해 Base Speed 한계점은 212.5 km/h이고, 특성비교는 표 3에 나타내었다.

표 3. 전동기 특성비교

항 목	V/f 감소전	V/f 감소후
출력 [kW]	1150	1150
주파수 [Hz]	53	53
전압 [V]	2183	1325
전류 [A]	364	599
효율 [%]	95.4	94.09
역률 [%]	92.69	90.09
중량비	1.29 : 1	
슬립 [%]	1.68	2.31

V/f비의 한계점까지 감소시켜 고속전철 전동기를 설계한 결과 기동시 전류가 235[A]가 증가하였다. 이것은 인버터에서 열, 전류용량 등에 중요한 영향을 미칠 정도로 증가하는 것을 알 수 있다. 그러나 전동기의 중량은 275.7[kg]의 감소를 가져왔기 때문에 전동기 설계시 경량화관점에서는 매우 만족스러운 결과를 보였다.

그림 5와 그림 6은 V/f비 감소전과 감소후의 전동기 주행특성곡선을 나타내었다.

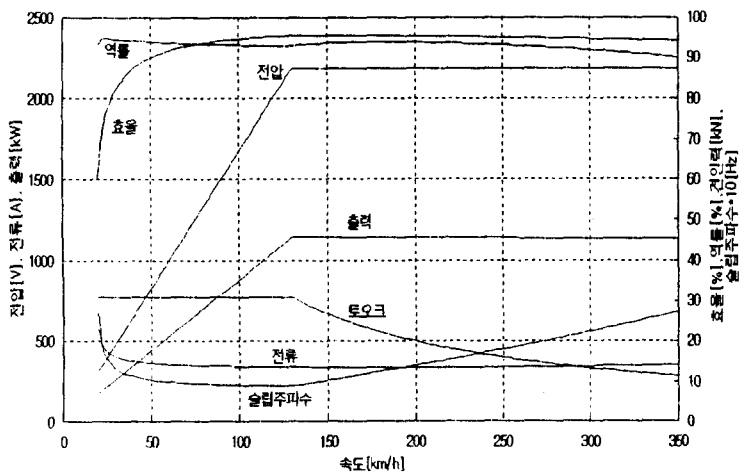


그림 5. 전동기 주행특성곡선($V_1/V_0=1$)

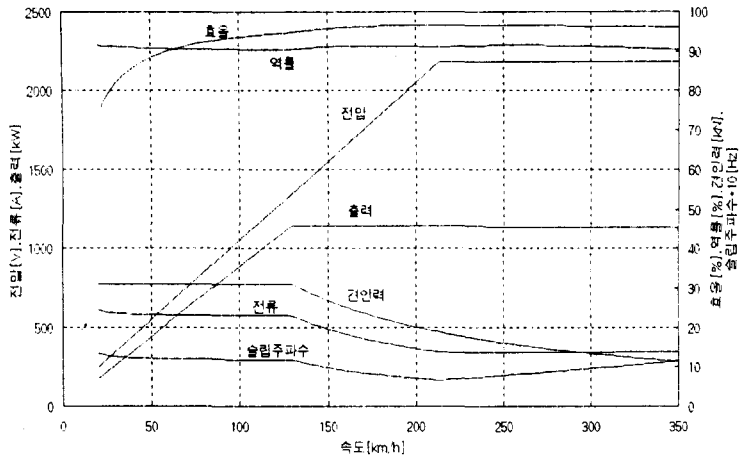


그림 6. 전동기주행특성곡선($V_1/V_0=1.64$)

6. 결론

본 논문에서는 인버터의 V/f운전패턴변화에 따른 고속전철용 견인전동기의 경량화의 경향과 그 특성을 전동기관점에서 고찰하였으며, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) V_1/V_0 비가 증가함에 따라 경량화설계가 가능하며, $V_1/V_0=1.8$ 에서 최적의 경량화 설계를 도출하였다.
- 2) V_1/V_0 비가 증가함에 따라 인버터의 열 및 전류용량 등에 중요한 영향을 미칠 정도로 증가하는 것을 알 수 있었다.
- 3) 기동시 최대속도에서의 최대토크/정격토크 비 이상을 확보하기 위한 V_1/V_0 비의 한계점을 알 수 있었다.

결론적으로 V_1/V_0 비의 지속적인 증가는 인버터의 전류용량, 열적능력 및 재료비 등에 중요한 영향을 미치므로 견인전동기만의 독자적인 설계가 아니라 인버터와의 인터페이스를 고려한 가변속 시스템 전반에 걸쳐 경량화 및 경제적 설계가 되어야 한다.

[참고문헌]

1. John L. Oldenkamp, "Selection and design of an inverter-driven induction motor for a traction drive system" IEEE Transactions on Industry Application, Vol. IA-21, No.1, 1985
2. "인버터-· 交流電動機 驅動電氣車의 現狀", 일본전기학회기술보고 제325호.
3. "견인전동기 개발(1차년도연차보고서)", 고속전철기술개발사업(G7)과제, 1997.
4. "고속전철 시스템요구사항(안)", 고속전철사업공단, 1997.