

인버터 특성을 고려한 견인전동기 설계와 제품동향

김종구, 권중록, 김근웅, 이정일
현대중공업주식회사 기전연구소

Design of Traction Motor with consideration of Inverter Characteristics & Products Trend for Subway Train Application

Jong-Ku Kim, Jung-Lock Kwon, Kun-Woong Kim, Jung-Il Lee
Hyundai Heavy Industry Mechatronics Research Institute

ABSTRACT

Since recent inverters are formed IGBT VVVF inverter its switching speed has been increased relative to the conventional inverters and the motor design based on the switching surge voltage at the inverter output is very important factor. Therefore, motor and inverter should be designed to have the optimal characteristics by considering the mutually limited conditions.

On this research the design technology characteristics for inverter driving traction motor is compared to the products in Korea and the analysis is performed. Thus, it is intend to re-estimate the technology level and introduce the products by HHI, which is driving on Seoul subway line 6 since December, 2000.

1. 서 론

최근 전동차용 견인전동기는 기존의 직류전동기 및 동기전동기에 비해 유지·보수가 용이하고, 짐작 및 제어성이 용이하면서도, 구조적으로 단순·견고한 유도전동기를 채택하고 있다.

차량의 안정적 성능 발휘를 위해 견인전동기는 차량 시스템과의 특성을 고려하여 설계되어야 하며, 특히, 인버터의 빠른 스위칭 속도로 인해 발생하는 인버터 출력단스위칭 써지, 구동방식 및 상호간의 제한된 조건을 고려하여 최적의 특성을 가질 수 있도록 설계되어야 한다.

본 논문에서는 인버터 견인전동기 설계기술의 특징을 국내에서 운행중인 제품과 비교·분석을 실시함으로써 기술수준을 평가하고, 당사에서 2000년 12월부터 서울지하철 6호선에서 영업운전중인 제품에 대한 기술적 특징을 소개하고자 한다.

2. 본 론

2.1 추진 System 구성 및 요구성능

AC 견인전동기 추진시스템은 그림 1과 같이 인버터로부터 전원을 공급받아 4대의 전동기가 병렬 운전되는 시스템으로 되어있다.

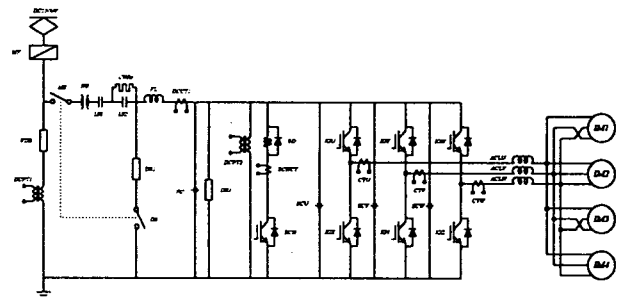


그림 1. AC 추진시스템 구성

국내 전동차에 도입되어 적용되고 있는 노선별 전동기 성능은 표 1과 같다.

표 1. 노선별 전동기 요구성능

구 분	개발품	4호선	7,8호선	대구 1	5호선	
기동토크, N.m	1,600	1,500	1,600	1,470	1,500	
속도 (rpm)	Base	1,830	1,429	1,830	1,464	1,600
	Max.	4,574	4,491	4,574	4,574	4,574
사 양	kW@ rpm	210 @2200	200 @1945	210 @2200	250 @1900	200 @2100
	Volt.	1100	1100	1100	1127	1170
	Cur.	136	130	150	150	132
중 량(kg)	650	780	550	695	620	

2.2 V/F패턴과 전동기 외관치수 설계

차량의 운전영역은 그림 2와 같이 토크의 제어형태에 따라, 가감속을 위한 정토크 영역, 전원설비의 용량한계로 입력이 제한되는 정출력 영역, 전동기 한계토크 특성으로 슬립주파수가 제한되어 운전되는 특성영역으로 분류된다.

전동기 치수는 V/F패턴을 낮추면 자속량의 감소로 경량화가 가능하나, 기동전류의 증가에 따른 인버터 전류용량 한계, 열용량 한계, 기동시 정격토크에 대한 최대토크의 여유를 고려하여 설계되어야 한다.

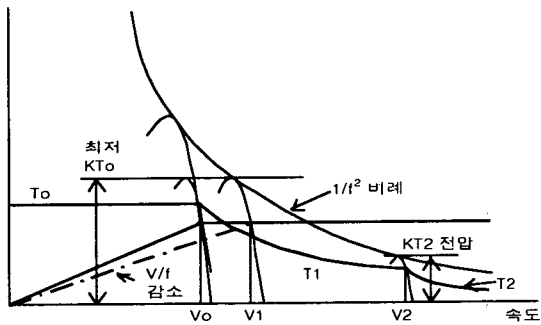


그림 2. 차량의 속도-견인력 곡선

그림 2의 속도 V_1 에서 V/F 패턴에 대한 토크 및 전압계산은 다음과 같다. 정출력 중단점의 토크 여유를 기준하여 기동토크 T_0 에서도 가질수 있도록 설계한다.

$$T_1 \max \geq kT_0 = k(V_2/V_1)^2 T_2 \quad (1)$$

정출력영역에서 $V_0 T_0 = V_2 T_2$ 전압은 (2)식과 같다.

$$V_1 \leq \sqrt{V_0 V_2} \quad (2)$$

기동전류는 인버터 연속정격 최대치의 80~85%가 되도록 선정하고, 전동기 정격은 열용량 한계조건을 고려하여 운행노선의 전류 및 주행 발열량을 계산하여 선정한다.

2.3 절연설계

인버터 출력전압의 스위칭 시 발생하는 써지전압은 전동기 입력단에서는 선로정수에 의해 중첩되어 스위칭 시 전압상승 시간이 짧은 경우 인버터 출력전압의 2~3배까지 되고^[4], 코일간의 분담전압은 균일하지 않게 되고 입력단자에 가까운 코일에 40~80%의 전압이 집중적으로 분포되어 전류밀도의 불균형을 일으켜 층간절연 단락을 초래하게 된다^[5]. 따라서, 반복되는 써지전압에 대해 열화가 없어야 하고, 유해한 코로나 방전이 없어야 한다.

표 3과 같은 운행환경 기준한 대지절연 전압 계산치는 1.5 kV이하 급이나, 국내의 견인전동기 절연내력은 AC 3.3 kV이상 급의 절연내력을 갖고 있다.

표 2. 견인전동기 운행환경(전압)

용량	200 kW 급	
구동방식	IGBT, GTO 구동	
정격전압	AC 1,100 V (Vdc 1,500V)	
전압변동	DC 1200 ~ 1800 V	
Rising Time	GTO	5 us ~ 20 us
	IGBT	0.7 ~ 1.5 us
Cable 길이	15 m 이내	

표 3. 국내 견인전동기 코일절연 구성

적용노선		개발품	4호선, 일산	5,7,8, 대구
코일 (층간)	주절연	H-DGC	H-DGC	Kapton
	보강절연	Kapton	Kapton	-
대지	절연	MicaKapton CR+Kapton	MicaKapton + Kapton	Mica Glass
	코로나	CR Filim	-	-
외장절연		Glass	Glass	Glass
인버터 Type		IGBT	GTO	GTO
필터 Type		L필터	-	-

- 당사에서 적용한 절연시스템 특징은 다음과 같다.
- 1) 고정자 코일결선은 그림 3와 같이 병렬회로가 2개인 2Y 결선방식을 적용하여 인덕턴스 증가로 급준서지 상승시간이 지연되도록 하였다.
 - 2) 스위칭 써지 및 반사파 과전압등에 의한 첫 번째 코일의 보호를 위해 그림 3와 같이 시작코일은 Kapton Tape로 보강하였다.
 - 3) 진공함침을 실시하여 결점이 없는 양질의 절연층을 형성하였고, 또한 절연층 내 보이드(Void)생성에 따른 코로나 현상의 유해한 효과를 제거키 위해, Mica Kapton CR(Corona Resistant)Tape를 대지절연물로 사용하였다.
 - 4) 그림 1과 같이 필터설치로 써지전압 상승시간을 지연되도록 하였다.

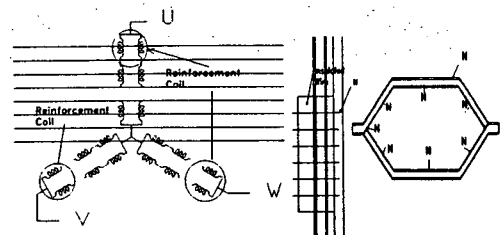


그림 3. 첫 번째 코일(시작부 코일) 써지전압 보호

2.4 베어링 설계

인버터에 의해 전동기를 가변속 구동할 경우에는 상용 전원 구동시 잔류자기, 자기적 불평형등의 전자기효과에 의해 발생하는 축전압과는 대조적으로 고정자와 회전자

권선간 정전용량성 결합효과로 축전압(V_{rg})이 발생되어 베어링의 마모를 초래하는 방전전류가 발생한다.^[6]

2.4.1 베어링 손상 메카니즘

인버터와 전동기간의 용량성 결합에 따른 커먼모드 전압에 의한 효과를 모델링 하면 그림 4와 같다.^[6]

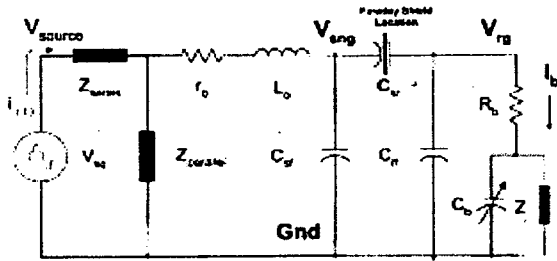


그림 4. 커먼모드 등가회로

V_{SNG}, V_{rg} : 중성점 전압, 축전압

C_{sf} : 고정자 권선과 프레임 간의 캐패시턴스

C_{sr} : 고정자 권선과 회전자 권선간의 캐패시턴스

C_{rf} : 회전자 권선과 프레임 간 캐패시턴스

C_b : 베어링 캐패시턴스

베어링의 절연파괴의 중요한 요소는 베어링 유막의 절연을 파괴 전압조건과 베어링 전류밀도가 베어링 수명에 미치는 영향이다. 이러한 관계를 정형화한 것이 베어링 전압비(Bearing voltage ratio, BVR)로서 전동기의 캐패시턴스와 축전압간의 상호관계를 예측할 수 있으며, BVR에 의해 C_b 나 C_{rf} 가 증가하면 V_{rg} 는 비례적으로 감소된다.^[6]

$$BVR = \frac{V_{rg}}{V_{SNG}} = \frac{C_{sr}}{(C_{sr} + C_b + C_{rf})} \quad (3)$$

여기서, C_{rf} 는 전동기 설계에 의해 결정되지만, C_b 에 영향을 주는 요소는 매우 다양하다.

2.4.2 베어링 손상 방지대책

축전압에 의한 베어링 손상방지를 위해, 첫째, 축의 임피던스를 낮추어 축전류 경로가 베어링에 형성되지 않도록 회전자축에 브러쉬(brush)를 설치하는 방법이 있으나, 브러쉬 마모, 접촉저항의 관리등 유지·보수에 많은 어려움이 있으며, 인버터 구동 전동기에서는 적용하기 매우 힘들다.

둘째, 절연베어링과 같이 베어링 외륜에 절연층

을 형성하여 누설전류 경로를 차단하는 방법으로서 효과는 우수하나 비용상승의 단점이 있다.

셋째, 인버터와 전동기간에 필터를 설치 또는 PWM 제어기법으로 커먼모드 전압을 감소시키는 방법이 있다.

국내에 적용중인 견인전동기는 축전류 경로를 차단하기 위해 절연베어링을 사용하며, 당사의 축전압 방지 대책은 절연베어링 사용외에 다음과 같은 특징을 갖고있다 .

- 1) 리드 Cable 재질 및 접지: Shield 처리된 리드 Cable과 접지로 축전압 의한 누설경로가 대지로 형성되도록 하였다.
- 2) 반부하축, 부하축 베어링에 절연베어링을 사용하였다.
- 3) 그림 1과 같이 필터의 설치, 최적의 PWM 제어기법을 적용 커먼모드 전압을 최소화하였다.

2.5 운행조건을 고려한 설계

철도차량용 AC 견인전동기는 구조적으로는 차량의 진동 및 충격, 고속회전 등에 대한 구조적 강건성이 요구되고, 병렬운전 및 차륜경 변동에 따른 토크불평형이 최소화되어야 한다. 본 논문에서는 병렬운전, 차륜경 차이에 따른 회전자 재질 및 회전자 설계방법에 대해 기술한다.

2.5.1 병렬운전을 고려한 설계

병렬운전 시 차륜경이 동일한 경우, 전동기의 슬립-토크특성이 다르면 그림 5와 같이 토크 불평형이 발생하며, 2차 저항에 가장 큰 영향을 받는다.

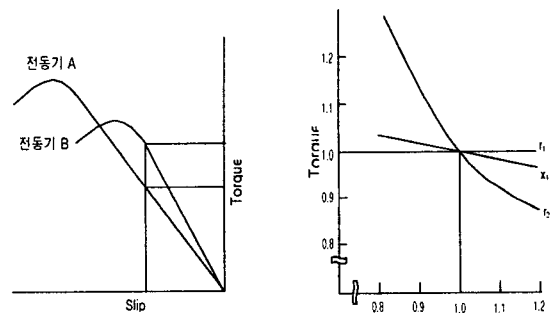


그림 5. 슬립-토크특성 및 회로정수에 따른 변화

따라서, 로터바는 온도변화 계수가 적고 저항율이 높으면 도체를 적용하면 전동기 체적이 증가하므로, 중량 제약 조건 및 전동기 특성을 고려하여 선정한다.

당사에서는 표 4와 같이 기계적 특성 및 전기적 특성이 우수한 크롬동을 로터바로, 엔드링은 로터바와 용접성우수하면서도, 고속회전시 원심력 등에 의한 안정성을 고려하여 지르코늄동을 적용함으로

써 고속회전, 토크 불평형에 대한 안전율을 높였고, 쉬링크 링의 제거로 구조의 단순화 및 비용을 저감하였다.

표 4. 로터 바의 물리적 특성

적용노선		4호선 일산선	대구	개발품 6,7,8호선
로터 바	재 질	황 동	무산소동	크롬동
	도전율	26 %	95 %	75 %
	인장강도	42 kg/mm ²	27 kg/mm ²	42 kg/mm ²
	온도계수	0.00146	0.0038	0.00315
엔드 링	재 질	무산소동	지르코늄동	지르코늄동
	도전율	95 %	75 %	75 %
	인장강도	27 kg/mm ²	42 kg/mm ²	42 kg/mm ²
	온도계수	0.0038	0.00315	0.00315

2.5.2 차륜경차와 정격슬립

전동기의 슬립-토크 특성 동일해도 차륜경의 차이가 있으면, 전동기는 그림 6과 같이 회전속도가 상이하게 되어 전류 및 토크 불평형을 발생시키고, 큰 토크의 차륜이 점착한계를 넘으면 공회전이 발생하여 점착효율이 저하한다. [2]

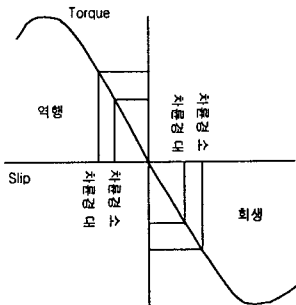


그림 6. 차륜경 변동에 대한 토크 불평형

차륜경 차이에 의한 불평형 특성은 표 5와 같이 역행과 회생시 역전되므로 열적인 측면에서는 평균화 된다.

표 5. 차륜경 차이에 따른 전동기 특성

동일 인버터로 구동되는 전동기	역행(주행)		회생(제동)	
	전류	토크	전류	토크
차륜경 大	大	大	小	小
차륜경 小	小	小	大	大

정격슬립은 차륜경차에 의한 토크불평형과 회전자의 온도상승을 고려하여 결정하며, 정격슬립이 작으면 전동기 효율은 좋아지나 토크불평형은 크게 된다. 따라서, 정격슬립 표 6과 같은 차륜경 관리

한계에 대한 차량성능, 전동기 성능 및 인버터 제어성을 고려하여 결정한다.

표 6. 차륜경차와 정격슬립

구 분	A	B	C	D
차륜경관리한계	11 mm	11 mm	6 mm	3 mm
정격슬립	3.9 %	3.0 %	2.5 %	1.5 %
최대토크불평형	15 %	19 %	15 %	12 %

국내에 운행되는 견인전동기 정격슬립 범위는 1.9 % ~ 2.4 % 범위이고, 당사의 제품은 정격슬립 2.2 %로 설계하였다.

2.6 개발품 기술적 특징

당사에서 서울지하철 6호선에 2000년 12월부터 영업 운전되는 견인전동기의 기술적 특징은 다음과 같다.

(1) 시스템 친화적 특성 설계

토크 불평형 등 1C 4M 구동조건, 차륜경 변동에 의한 토크 불평형 고려한 회전자 도체선정 및 치수 설계를 하였으며, 인버터 스위칭 써지전압을 첫 번째 코일은 Kapton Tape를 사용 층간절연내력을 강화시켰으며, 주절연물로 CR Tape를 사용하여 코로나를 방지할 수 있도록 하였다.

(2) 소형·경량화에 의한 고 출력밀도화

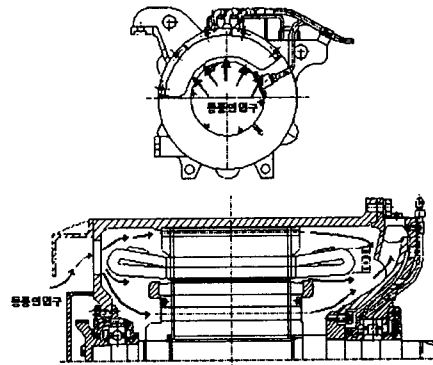


그림 7. 개발품 냉각구조

온도상승 및 반폐자냉식 방열구조 해석에 의한 냉각효율 검증을 통해 그림 7과 같이 다중통풍로 냉각구조를 적용하여 냉각효율을 극대화하였으며 기계적으로 안정하면서도 우수한 도전율의 회전자 도체(크롬 동바)를 적용하여 발열을 최소화하였다.

(3) 고효율 및 고성능화

최적설계 알고리즘(Evolution Strategy)과 민감도법을 적용한 유한요소해석으로 운전성능을 향상하였고, 우수한 전기적·기계적 강도를 가진 회전자

도체 채택으로 부하변동에도 특성변화가 작도록 설계하였다.

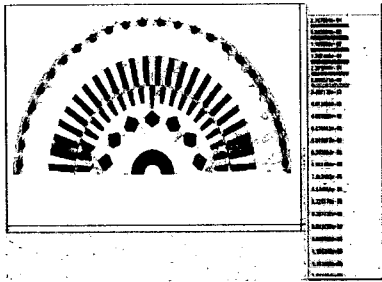


그림 8. 유한요소 해석

(4) 신뢰성 확보

운행 시 발생될 수 있는 진동, 충격 등에도 안전한 프레임 구조설계, 인버터 구동조건을 고려한 절연시스템 설계와 중력식 냉각공기 흡입방식을 채택하여 내환경성을 강화하였다.

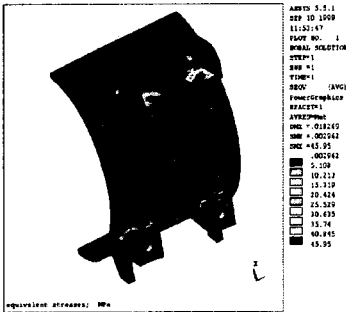


그림 9. 프레임 구조해석

3. 결 론

본 논문에서는 인버터 특성을 고려한 전동차용 AC 견인전동기의 기술적 특징을 국내노선에 운행 중인 제품과 비교하여 기술수준을 고찰하였고, 아울러, 서울시 6호선에 영업운전중인 당사 개발품의 기술특징을 소개하였다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 견인전동기 치수설계는 인버터의 V/F패턴에 따른 한계전류 조건과 열용량을 만족하도록 설계해야 한다.
- 2) 고정자 권선의 절연은 인버터의 스위칭 써지전압과, 코로나 등에 의한 유해한 효과가 없어야 하며, 국내노선에 적용중인 절연구성을 검토결과 절연내력은 정격전압(AC 1.1kV)보다 최소한 3배 이상 높게 설계되었으며, 개발품은 IGBT 구동을 고려 첫 번째 코일의 절연보강과 CR(Corona Resistant)절연재를 사용하여 절연내력을 강화시켰다.

- 3) 인버터 구동시 인버터와 전동기간의 용량성 결합에 의한 축전압에 의한 손상 메카니즘 및 사례검토 결과, 국내의 견인전동기는 축전류 경로 차단을 위해 절연베어링을 채택하였으며, 당사는 절연베어링 외에 필터설치, PWM 제어기법 등으로 축전류에 의한 손상가능성을 최소화하였다.
- 4) 회전자 도체는 병렬운전, 차륜경 변동, 환경변화 등에 토크불평형을 고려하여 선정해야 하고, 당사 차륜경 관리한계 조건을 고려하여 기계적 특성을 만족하면서도 전기적 특성이 좋은 크롬동바를 적용하였다.
- 5) 2000년 12월부터 서울시 6호선에 영업운행중인 개발품의 기술적 특징을 소개하였고, 99년부터 공장구내시험을 시작으로 2년 이상의 현차 탑재 시험과 6개월의 본선시운전을 통해 성능, 기능 및 신뢰성면에서 우수한 결과를 발휘하고 있다.

참 고 문 헌

- [1] Lloyd. W. McSparran, "Considerations in the Specifications of AC Propulsion Equipment for Passenger Vehicles", IEEE/ASME Record, pp. 95~101, 1995.
- [2] G.B. Anderson, A.J.Peters, "Design Assesment and Implementation of Three-Phase Asynchronous A.C. Traction Motor System for North America", Rail Conf., IEEE/ASME Joint, pp. 151~159, 1991.
- [3] N. Bianchi, S. Bolongnari, "Design Procedure a Vectot Controlled Induction Motor for Flux-Weakening Operations", IEEE Industry Applications Annual Meeting, pp. 104~111, 1997.
- [4] L. Gubbala and A. von Jouanne, P. Enjeti, W. Gray, C Singh, H. Toliyat, "Voltage Distribution in the Windings of an AC Motor Subjected to High dv/dt PWM Voltages", IEEE/PESC Record, pp. 579~585, 1995.
- [5] Austin H. Bonnett, "Analysis of the Impact of Pulse-Width Modulated Inverter Voltage Waveforms on AC Induction Motors", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 32, No. 2, pp. 386~392, 1996.
- [6] Dolye Busse, Jay Erdman, Russel J. Kerkman, "Bearing Currents and Their Relationship to PWM Drives", IEEE Trans., Vol 12, pp. 243~252, 1997.