



한국형 고속전철 추진시스템

류 흥 제, 김 종 수, 임 근 희
(한국전기연구소 전력전자부)

1. 서 론

고속전철 시스템은 고속운전이 가능할 뿐아니라 전기에너지를 사용하므로 환경친화적이며 에너지를 보존할 수 있어 선진국들을 중심으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 이에 따라 우리나라에서도 자체기술로 고속전철을 개발운영하기 위한 노력이 이루어지고 있으며 1996년부터 G-7과제로 이를 추진하고 있다.

고속전철의 추진시스템은 현재 일본을 중심으로 사용되고 있는 신간선, ICE 2.2 등의 동력분산식 시스템과 유럽에서 널리 사용되고 있는 TGV, ICE 1, ICE 2 등에 사용되고 있는 동력집중식으로 크게 구분된다. 각 동력 시스템은 각각의 장단점을 지니고 있으며, 아직 한국의 차세대 고속전철에 어떤 형식의 추진시스템을 장착할 것인지는 결정되지 않은 상태이다.

여기서는 각 동력시스템의 장단점을 살펴보고, 현재 고려되고 있는 동력집중식 Baseline Model과 동력분산식 Baseline Model중 300m 편성에 대하여 견인전동기 및 주전력변환장치의 기본설계안을 제시한다. 각 동력방식에 대한 설계 기본 사양은 표 1과 같다.

2. 동력집중식과 동력분산식 비교

유럽에서 널리 사용되어온 동력집중식 차량은 국내에 도입하기로 되어 있는 TGV-Korea와 같이 추진과 관련된 동력장치가 한 대의 차량에 집중되어 있는 형태로 제작비용이 저렴하고 유지 보수비가 적으며, 객차에서의 진동 및 소음이 적고 전체 중량이 적게 나가는등의 장점을 지니나 무거운 축중 및

표 1 각 동력방식에 따른 기본사양

동력방식	동력집중식 (CPT300)	동력분산식 (DPT300)
차량편성	2P+2M+12T	6M + 6T
동력축	12개	24개
열차중량	630ton	696ton
열차길이	313m	299m
승객수	736	913
최대축중	17ton	14.5ton
현가하중량	2.2ton	1.4ton
연속추진동력	13200kW	13200kW
최대운행속도	350 km/h	350 km/h
공력저항	120kN 이하	
이용점착계수	최대 : 0.2, 최소 : 0.08	최대 : 0.13, 최소 : 0.03
제동방식	회생, 비접촉, 마찰제동	
현가장치	semi-activ control	
판토 그래프	semi-activ control	

높은 요구 점착계수 등으로 인하여 최초 목표인 1000명의 승객을 태우고 350 km/h의 속도로 운행하기 위해서는 추가 동력차가 필요하게 되며, 2P,2M의 구성으로는 약 730명의 승객이상을 태우는 것이 어려워지는 단점이 있다.

이와는 달리 동력이 전 차량에 골고루 분산되어 있는 동력분산식 차량의 경우 축중 및 낮은 요구 점착계수로 고속운전이 용이하며, 궤도보수비가 저렴해지고, 많은 승객을 태울 수 있으며 선로 및 운행조건에 따라 차량구성변경이 용이하며 회생제동을 충분히 이용할 수 있는 장점이 있으나 제작비용이 증가되고 TGV-Korea와의 호환성을 유지하기 어려운 단점이 있다.

참고로 최근 300 Km/h이상의 운행속도를 내기위한 고속전철의 기술개발 동향은 일본뿐 아니라 동력집중식을 사용하

던 유럽의 경우도 동력분산식을 채택하는 추세이다. 본 논문에서는 표 1에 나타난 동력집중식 차량과 동력분산식 차량의 경우에 대한 견인유도전동기 및 주전력변환장치를 설계하도록 한다.

3. 견인전동기 설계

한국형 고속전철의 추진시스템은 ICE차량에 근간을 두고 집중식 차량의 경우 추진을 제외한 부분은 TGV-Korea를 근간으로 하고 분산식 차량의 경우 일본의 신간선 차량보다는 접근이 용이한 ICE3차량을 근간으로 설계하였다. 동력집중식을 사용하는 경우 열차의 편성이 16량으로 제한되거나 1000명을 태우기 위해서는 동력차량을 하나 더 장착하여야 하는 문제가 큰 단점으로 발생하며, 동력분산식을 채택하는 경우 탑승인원을 늘리는 것이 가능하며 이 경우 300m 편성만으로 1000명의 승객을 태울 수 있는 잇점이 있다.

여기서는 각 동력방식에 대한 하나의 안으로 견인전동기를 설계해 보도록 한다.

견인유도전동기를 설계하기 위한 견인력을 구하기 위한 열차의 운전방정식은 식(1)의 형태로 나타난다.

$$W(1+x)\frac{dV}{dt} = T - (R_r \pm R_g + R_c) \quad (1)$$

- 여기서 W = 열차의 총중량
- x = 회전부분에 관계되는 관성계수
- T = 동력차 견인력(속도의 함수)
- R_r = 주행저항 (kg)
- R_g = 구배저항 (kg)
- R_c = 곡선저항 (kg)

3.1 동력집중식 차량의 견인유도전동기

기계분야에서 제시한 동력집중식 차량의 주행저항식은 식(2)와 같다.

$$R = 377 + 5.04v + 0.07153v^2 \text{ [daN]} \quad (2)$$

여기서 v : 시속 [km/h]

먼저 식 (2)를 이용하여 먼저 주행저항을 구해보면, 시속 350 km/h에서 109.03 kN이며 385 km/h에서 126.2 kN 이 된다. 350 km/h에서의 요구 점착계수값을 독일 철도청에서의 추천값 0.07을 기준으로 최대 가능 견인력을 계산해 보면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{견인력} &= 9.8 \times \text{축중} \times \text{구동축수} \times \text{이용점착계수} \quad (3) \\ &= 9.8 \times 17 \times 12 \times 0.07 \\ &= 140.53 \text{ [kN]} \end{aligned}$$

이는 동력집중식 차량의 축중과 점착계수의 한계상에서 시속 350km/h에서 낼 수 있는 최대견인력을 뜻하며, 주행저항만을 이용하여 관성계수를 0.038로 가정하는 경우 식(1)로부터 350km/h에서의 가속여력을 구해보면 0.0482m/sec²이 된다. 따라서 전동기 한 대의 출력은 다음 식 (4)로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P &= F \cdot v / \text{전동기수} \quad (4) \\ &= 140.5 \times 97.22 \text{ [m/sec}^2\text{]} / 12 \\ &= 1,185 \text{ kW} \end{aligned}$$

이 전동기출력은 설계최고속도 385 km/h를 내기 위한 출력 1200 kW보다는 작은 값이나 380 km/h의 속도는 가능하다.

기동견인력을 구해보면 식 (3)에서부터 기동시의 최대점착계수를 TGV-Korea의 값 0.188을 사용하면 기동견인력은 375 kN이 되며, 기동가속도는 기동저항을 TGV-Korea의 값 3.7 kN을 이용하는 경우 0.589 m/sec², 견인전동기 한대의 기동토크는 바퀴반경을 885 mm, 기어비를 2.02, 동력전달 효율을 0.96으로 가정할 때 식 (5)로부터 7,124 N.m가 된다.

$$\text{Torque} = \frac{\text{Force} \times \text{바퀴반경}}{\text{Gear비}} \div \text{동력 전달 계수} \quad (5)$$

설계된 동력집중식 기본모델의 견인유도전동기 사양을 표 2에 나타내었다.

표 2 동력집중식 견인 유도기 사양

		사 양
용 량		1,185 [kW]
전 압		2,200 [V]
전 류		379 [A]
극 수		4
주파수	Base	53.5 [Hz]
	최 대	143 [Hz]
R.P.M	Base	1,585 [r.p.m]
	최 대	4,240 [r.p.m]
Torque	기동시	7,142 [N · m]
	최대 속도시	2,669 [N · m]
최 고 속 도		350 [km/h]
Gear 비		2.02
바 퀴 반 경		885 [mm]
전동기 중량		1,905 [kg]
중량 / 출력		1.6 [kg/kW]

3.2 동력분산식 차량의 견인유도전동기

독일의 DE-consult에서 제시한 한국형 고속전철 400m의 주행저항식은 다음과 같다.

$$R = 506.4 + 3.92v + 0.0719v^2 \text{ [daN]} \quad (6)$$

이 식을 이용하면 시속 350km/h에서 106.9kN 이며 385 km/h에서 126.73 kN이 된다.

이는 식 (3)으로부터 충분히 얻을 수 있는 값이며, 집중식 차량과 같이 350 km/h의 속도에서 가속여력 0.0482 m/sec² 을 가지려면 식 (1)로부터 141.7 kN 이 필요하다. 식 (4)로부터 견인전동기 한 대의 출력을 구하면 574 kW가 된다. 식 (3)으로부터 이용점착계수를 0.13으로 하여 기동견인력을 구하면 443 kN이 되며 이때의 기동가속도는 0.631 m/sec² 로 집중식보다 많이 유리함을 알 수 있다. 이때의 견인전동기 한 대의 기동토크를 DE-Consult사에서 추천한 바퀴반경 920 mm과 ICE3의 기어비 2.78을 사용하여 식 (5)로부터 구하면 3,182 N.m가 된다.

설계된 동력집중식 기본모델의 견인유도전동기 사양을 표 3에 나타내었다.

표 3 동력분산식 견인 유도기 사양

		사 양
용 량		574 [kW]
전 압		1,515 [V]
전 류		267 [A]
극 수		4
주파수	Base	53.4 [Hz]
	최 대	187 [Hz]
R.P.M	Base	1,603 [r.p.m]
	최 대	5,610 [r.p.m]
Torque	기동시	3,182 [N · m]
	최대 속도시	1,017 [N · m]
최 고 속 도		350 [km/h]
Gear 비		2.78
바퀴 반 경		920 [mm]
전동기 중량		828 [kg]
중량 / 출력		1.44 [kg/kW]

4. 주전력변환장치 설계

각 차량에 설치된 차상전기 시스템의 용량 산정을 위하여 여기서는 추진시스템과 관련된 주전력변환장치를 설계하도록 한다.

4.1 견인 전동기 사양

열차의 주행저항 및 운전방정식 기동추진력 및 기동가속도

등을 고려한 집중식고속전철시스템의 기본모델에 대한 3상농형견인유도전동기의 설계사항은 표 1과 같고, 분산식고속전철 시스템의 기본모델에 대한 사항은 표 2와 같다. 전동기의 효율(η_M)을 0.95로 가정하여 각 전동기의 입력용량을 구해보면

동력집중식의 경우

$$\begin{aligned} P_{MI} &= P_{MO} / \eta_M \\ &= 1185 \text{ kW} / 0.95 \\ &= 1248 \text{ kW} \end{aligned}$$

동력분산식의 경우

$$\begin{aligned} P_{MI} &= P_{MO} / \eta_M \\ &= 574 \text{ kW} / 0.95 \\ &= 605 \text{ kW} \end{aligned}$$

4.2 PWM인버터 사양

인버터의 효율(η_{IN})을 0.97, 전동기역률(P_M)을 0.82로 가정하여 용량을 검토하면,

동력집중식의 경우

$$\begin{aligned} \text{용량 : PI} &= \text{구동전동기 수} * P_{MI} / P_M \\ &= 2 * 1248 \text{ kW} / 0.82 \\ &= 3044 \text{ kVA} \end{aligned}$$

출력전압 : 2200 V

출력전류 : 758 A

동력분산식의 경우

$$\begin{aligned} \text{용량 : } P_1 &= \text{구동전동기 수} * P_{MI} / P_M \\ &= 4 * 605 \text{ kW} / 0.82 \\ &= 2951 \text{ kVA} \end{aligned}$$

출력전압 : 1515 V

출력전류 : 1068 A

GTO를 사용한 인버터의 경우 최대스위칭 주파수가 제한되므로 견인유도전동기에 공급되는 전압 및 주파수를 가변시키기 위한 인버터의 동작모드는 크게 세가지로 나누어지며 이를 간단히 설명하면 다음과 같은 세가지 모드로 크게 나눌 수 있다.

(1) 최대 주파수 변조 모드

인버터는 GTO의 최대가능 스위칭 주파수($f_{GTO} = f_{max}$)로 운전되며 전압의 크기와 주파수는 PWM에 의해 결정된다. GTO의 스위칭 주파수와 출력전압의 주파수는 같지 않으며

출력전류는 일반적으로 사인형태가 된다.

(2) n-pulse 변조 모드

인버터는 기본파의 주파수에 비례하여 운전되며, 주파수는 양, 음의 반주기동안의 전압펄스수에 의해 결정된다. 크기는 PWM으로 조절하며 요구되는 스위칭주파수가 GTO의 최대 스위칭 주파수 이상이 되는 경우에는 반주기당 펄스 수를 줄여간다. 펄스 수와 변조방법에 따라 출력전류에는 고조파성분이 포함되며, 최소변조는 반주기당 하나의 펄스를 갖는 기본파주파수로 변조하는 경우에 발생된다.

(3) 기본파 주파수 변조 모드

GTO의 스위칭 주파수는 기본파 주파수와 비례하여 변하며 전압펄스열이 반주기마다 형성된다. 이 모드로 동작시 인버터의 기본파의 크기는 변화시킬 수 없다.

4.3 4상한 컨버터사양(2대 병렬운전)

그림 1과 같이 4상한 컨버터 두 대를 병렬운전하는 경우 컨버터의 용량은 다음과 같이 계산가능하다.

먼저 컨버터의 효율(η_{con})을 0.97로 가정하면

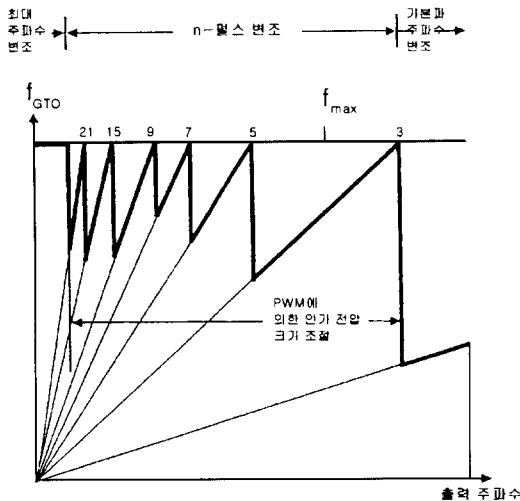


그림 1 인버터 동작 모드에 따른 스위칭 주파수 및 펄스수

동력집중식의 경우

$$\begin{aligned}
 \text{전체용량} : 2 * P_C &= P_1 * P_M / \eta_{IN} \\
 &= 3044 * 0.82 / 0.97 \\
 &= 2574 \text{ kW} \\
 P_C &= 1287 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

출력전압 : $V_{DC} = 2900V$

출력전류 : 444 A

입력전압 : 교류 1400V, 60Hz

동력분산식의 경우

$$\begin{aligned}
 \text{전체용량} : 2 * P_C &= P_1 * P_M / \eta_{IN} \\
 &= 2951 * 0.82 / 0.97 \\
 &= 2496 \text{ kW} \\
 P_C &= 1248 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

출력전압 : $V_{DC} = 2200V$

출력전류 : 567 A

입력전압 : 교류 1400V, 60Hz

4상한 컨버터(4QS)는 펄스제어형 컨버터로 전원측으로 전력을 회생시켜 공급할 수 있는 능력을 가지며, 교류전원으로부터 모든 유효전력을 공급하는 것이 가능하고, 나아가 고조파로 인한 선전류의 왜곡을 신호와 통신시스템에 영향을 미치지 않는 수준으로 유지할 수 있다.

GTO 사이리스터의 스위칭 시간과 스위칭손실로 인하여 스위칭 주파수는 제한되며, 출력전류 I와 초퍼입력전압은 높은 주파수의 고조파를 함유하게 되고 선전류에서는 더욱 심해지나 이러한 단점은 두 대의 4상한 컨버터를 병렬로 연결하여 위상지연에 의해 스위칭하는 경우 크게 감소하게 된다. 그림 2에 4상한 컨버터 두 대 병렬연결운전시의 대표적인 입력전류파형을 보였다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 컨버터의 병렬운전시 다음과 같은 많은 잇점을 지니게 된다.

- GTO 사이리스터의 전류스트레스 감소
- 초퍼 모듈의 열 스트레스 감소
- 선 고조파의 저감
- psophometric 전류의 감소
- redundancy

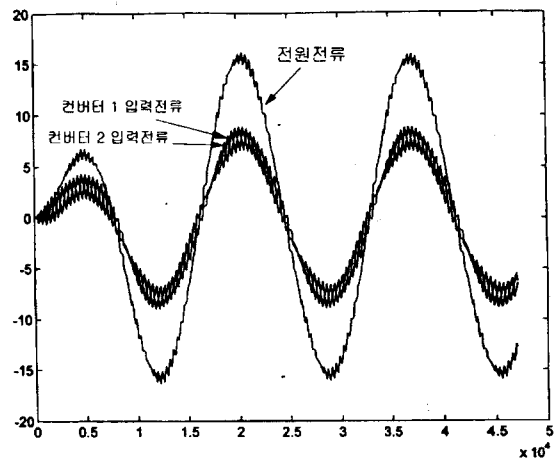


그림 2 컨버터 입력전류 및 변압기 입력 파형

4.4 기타 변환장치

전체 추진시스템과 관련된 전기시스템을 그림 3에 나타내었다.

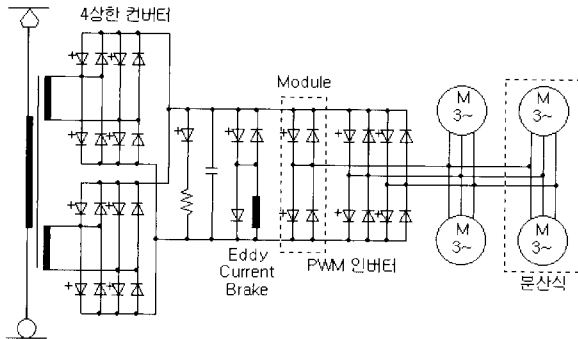


그림 3 추진관련 블록 다이어그램

그림에서와 같이 각 컨버터와 인버터는 동일한 구조의 상모듈을 사용하여 유지보수가 쉽게 되며 비접촉제동장치를 위한 강압형 초퍼가 DC링크단에 추가될 예정이다. 또한 비접촉제동장치의 전원으로는 보조권선을 사용하는 방법도 고려중이며 어느 경우에서도 회생시의 회생에너지 사용이 가능하므로 정격에는 영향을 미치지 않는다. 링크단 좌측의 저항과 스위치는 회생제동시에 전원측의 에너지 회수가 불가능하거나 직류링크전압이 과도하게 상승하는 경우 작동하는 저항제동장치이다.

4.5 주변압기

주변압기는 두 동력방식 모두 6개의 주권선(전동기 블록 1개당 2개의 권선이 각각 4상한 컨버터에 전원 공급)으로 구성되며 보조전원용 권선의 경우 하나의 권선으로 사용하는 방법과 몇 개의 보조권선으로 나누어 사용하는 방법이 가능하다. 4상한 컨버터의 용량으로부터 주변압기의 용량을 역산하면 주권선 용량을 구할 수 있으며, 보조전원에 사용되는 용량은 TGV-Korea와 ICE3의 데이터를 참조하여 계산하면 약 1000kVA정도로 예상된다. 이를 바탕으로 변압기 용량을 다음과 같이 계산할 수 있다.

1차전압 : 25 kV, 60 Hz

주권선전압 : 1400 V, 60 Hz * 6

보조권선전압 : 1100 V, 60 Hz 또는 330 V, 60 Hz * 2

주권선 용량 :

$$\text{동력집중식 } P_{tr1} = P_c / \eta_{con}$$

$$= 1287 \text{ kW} / 0.97$$

$$= 1327 \text{ kVA}$$

$$\text{동력분산식 } P_{tr1}$$

$$= P_c / \eta_{con}$$

$$= 1248 \text{ kW} / 0.97$$

$$= 1287 \text{ kVA}$$

보조권선 용량 : 약 1000 kVA (1100V 또는 330V)

입력용량 :

$$\text{동력집중식 } P_{tr}$$

$$= (P_{tr1} * 6 + P_{tr2}) / \eta_{tr}$$

$$= (1327 * 6 + 1000) / 0.97$$

$$= 9239 \text{ kVA}$$

$$\text{동력분산식 } P_{tr}$$

$$= (P_{tr1} * 6 + P_{tr2}) / \eta_{tr}$$

$$= (1287 * 6 + 1000) / 0.97$$

5. 결 론

본 논문에서는 현재 G-7과제로 추진중인 한국형 고속전철의 동력집중식 기본모델과 동력분산식기본모델에 관한 장단점을 고찰하고 추진장치관련 시스템을 살펴보았다. 견인전동기로 3상 4극 농형 유도전동기를 설계하고 이를 구동하기 위한 PWM인버터와 입력단의 4상한 컨버터를 설계하고 이의 구동원리 및 하모닉 제거 알고리즘을 제시하였다. 전체차상 전기 시스템은 고속전철 개념설계의 하나의 안으로 설계한 것으로 계속된 연구를 통해 검토하여야 한다.

참 고 문 헌

- [1] "고속 전철 핸드북", 한국고속철도 관리공단, 1993.
- [2] 고속전철기술 조사위원회, "기술조사보고 제2호: 고속전철 기술현황", 대한전기학회, 1992.
- [3] "The Overview of Trends of high-Speed Trains", Parker & Associates Inc., 1997.
- [4] W.M Futhrer et. al., "Water-Cooled High Power GTO Converters For Electric Traction", EPE'93, pp.294~299, 1993.
- [5] Wolfgang Runge et. al., "Some Aspects of the Circuit Design of High-Power GTO Converters", EPE'89, pp.1555~1560, 1989.
- [6] Diermar Lubke, "ICE High-tech on Rails", Hestra-Verlag
- [7] G. Coset, "The New Generation of SNCF high-speed rolling stock: The TGV-Atlantique Train", Rail Engineering International Edition No.3,

- pp.15~19, 1986.
- [8] "고속철도 차량시스템 엔지니어링", 한국고속철도, 1996.
- [9] R. Marquardt, "High Power Converter for the New German High Speed Train ICE", EPE'89, pp.583~587, 1989.
- [10] P. L. Alger, "The Nature of Induction Machines", Gordon and Breach, Science Publishers, Inc., New York, 1965.

〈 저 자 소 개 〉



류홍제

1969년 3월 4일생. 1991년 성균관대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 2월 - 현재 한국전기연구소 전력전자부 연구원.



김종수

1959년 12월 26일생. 1982년 서울대 전기공학과 졸업. 1991년 경남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년~현재 한국전기연구소 전력전자부 선임연구원.



임근희

1955년 10월 7일생. 1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 Virginia Polytechnic Institute and University 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 Virginia Polytechnic Institute and University 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전력전자부 책임연구원.