

◆ 特 輯 (Ⅲ) ◆

전기철도 차량의 추진제어 기술개발 동향

I. 서 론

최근 전기철도차량에 있어서 추진시스템의 기술발전은 Maintenance free화라는 시대적 요청과 대용량 반도체소자, 마이크로프로세서 제어기술의 발전에 의해 최근 급격히 변화 추세에 있다.

추진시스템 (Propulsion system)에 있어서 변화는 과거 저항제어방식 (Cam Shaft Contactor Rheostatic Control System)과 Thyristor 위상 제어방식에서 대용량 반도체소자인 GTO Thyristor와 Microprocessor 제어기술의 발전에 따라 VVVF Inverter 제어방식으로의 변화이다.

II. 추진시스템의 발전추세

추진시스템에서 가장 큰변화는 대용량 반도체인 GTO소자와 IGBT의 적용이라 할 수 있다.

과거 기동시 가속특성을 만족시키는 직류전동기 Brush가 필요없고 출력에 비해 중량이 작은 교류 유도전동기를 철도차량에 적용함으로써 보수유지비를 대폭 경감할수 있는 Maintenance free화 및 Regenerative braking에 의한 운전전력비의 절감으로 Energy Saving이 가장 큰 성과라 할 수 있다.

Ⅲ. 전기철도차량 Propulsion system의 종류와 전망

전기차량의 주요구동 제어시스템의 실용예와 향후 전망은 다음과 같다.

1. 직류전철

직류전철은 통상 750V, 1,500V를 사용하며 동구와 유럽 일부국에서는 3,000V의 전압을 사용하는 방식으로 차량구조는 간단하나 지상변전 설비비가 높은 반면 터널 건설비가 낮아 지하철에서 주로 사용하는 방식이다.

1) 저항제어방식

이 방식은 직·병렬제어 및 약계자제어를 하고 Cam Shaft control Rheostatic control system이라 하며 계자제어방식은 현재 재래형 직류, 교·직류 전기차의 주요방식이며 향후 급속히 감소해 가는 추세이며 열차 밀도가 적지않은 선로에 사용되고 있다.

한국의 철도청 및 지하철 1,2호선에 사용된 방식으로 Dynamic brake를 사용함으로써 에너지 손실이 크다.

계자첨가여자제어방식은 일본 JR의 80년대 중반 제작한 일부 기존저항방식 차량을 개량한것으로 일부 직류, 교직류 전차에 채용되어 있으나 경제성의 관점에서 불리하다. 계자초퍼제어방식은 직류복권전동기를 사용함으로 전력회생이 가능함으로 일본의 일부 민철에서 사용되고 있는 방식이다.

2) 초퍼제어방식

80년대까지 지하철의 주방식이었으나 경제성 에너지 효율면에서 급격히 인버터제어방식으로 변환되고 있으며 서울지하철의 3,4호선 및 부산지하철에 적용된 방식이다.

3) 인버터제어방식 (Inverter control system)

이 방식은 통상 Variable Voltage Variable Frequency 방식으로 보수유지비의 경제효과면에서 최근 세계각국 지하철의 신조차량의 주종을 이루며 유럽 및 일본 JR의 화물기관차 등에 신규 적용되고 있다.

특히 Linear-motor를 사용하는 방식은 최근 경량철도 개발과 함께 향후 주요 연구대상이 되어야 할 것이다.

2. 교류전철

교류전철은 15KV, 20KV, 25KV를 주로 사용하며 주파수는 16 2/3Hz, 50, 60, 70Hz들이 주로 사용되며 송배전 효율이 높아 장거리 철도에 많이 쓰이며 지상변전설비비가 낮은 대신 차량의 기기가 복잡하며 차량가격이 높아진다. 최근에는 터널건설에 있어 단면적을 크게하지 않고 송배전을 할 수 있는 R-bar 공법을 적용한 한국의 과천, 분당선은 지하 25KV로 건설 되었다.

1) Tap 제어방식

2차 코일의 권선비를 바꿔서 제어하는 방식으로 과거 유럽의 주류방식이었으며 절연 및 보수면에서 보수유지가 비교적 복잡하다.

2) Thyristor 위상제어방식

탭제어에서 절체방식을 스위칭하여 무점점화한 방식으로 철도청의 중앙선이나 기존 일본의 신간선 0계, 100계, 200계 유럽 전기기관차의 주방식으로 성능면이나 경제성의 관점에서 인버터 제어방식으로 변환 추세이다.

3) Thyristor 위상제어방식 + 전류형인버터방식

직류전차와 같이 TGV-A에까지 채택되었고 한국의 고속철도차량의 계획방식이나 전세계적으로 동기전동기는 사라져가는 추세이다.

4) PWM Converter-VVVF Inverter 제어방식

서독의 ICE, JR의 300계, WIN 350, 유러터널 TGV 차량에 적용된 방식으로 Hi-Tic. 고성능화 Microprocessor 제어기술과 대용량 GTO소자를 주로사용하는 최첨단 방식이다.

3. Thyristor 위상제어방식과 GTO Converter & Inverter 방식의 비교와 적용예

싸이리스터 위상제어방식은 직류전동기를 구동하는 방식으로 직류전동기의 제어성능의 장점으로 위상제어방식의 용이성을 충분히 사용한 방식이다. 전원측에서 본 경우 입력역률이 낮고 고조파 전류가 많은 등의 결점이 있으며 최근 마이크로 프로세서 제어기술과 대용량 반도체 소자의 발달로 유도전동기 구동이 용이해 짐으로 에너지절약, maintenance free화를 목적으로 전력회생이 가능한 4상한 GTO Converter가 고속철도를 중심으로 사용된다

1) PWM 콘버터 제어차량의 개발

종래의 직류전동기대신 교류전동기를 GTO 싸이리스터를 사용해서 인버터로 구동하는 PWM Converter & VVVF Inverter 제어방식은 신간선, ICE 차량에 이어 한국의 철도청 과천·분당선에 도입되어 실용화가 확산되고 있다.

교류전원을 입력으로 하는 전기차량에 있어서 인버터 입력전원으로는 직류전원이 필요하며 교류직류변환기를 필요로 하므로 교류입력전원의 파형이 정현파에 가깝고 입력역율이 좋은 변환기 방식으로 PWM방식이 개발되었고 이는 GTO와 다이오드를 이용한 단상 인버터와 동등한 회로이고 GTO를 고조파 변조동작시켜 동작시킴으로 입력전류의 파형과 위상각을 자유로이 제어가 가능하다.

2) PWM Converter와 Thyristor 위상제어방식의 비교

PWM Converter와 Thyristor 위상제어방식의 비교는 PWM Converter가 각 단일 컨버터의 변조파형을 일정각도 만큼 변환하여 전류리플의 해소로 주변압기가 결합되고 1차전류파형 리플이

저감되고 고조파 전류의 함유량이 적어지며 전류와 전압의 위상차도 거의 0으로 하게되어 역율이 양호하고 효율이 좋은 시스템으로 할수 있고 최대전력 사용시 Jp값이 적은 저Jp가 실현가능하다. 다만 PWM Converter는 고조파 출현이 변조파에 좌우되어 3~4Hz 주파수대에서 Peak가 나타나 Jp가 없는 중간주파수대의 고조파에 대해서도 배려해야 한다.

즉 위상제어방식은 역률저하로 전압강하에 의한 전력손실이 크므로 통신장에 신호장애에 대한 차폐 설비가 필요한 반면 컨버터 제어방식은 4상한 동작이 가능하여 P/B 전환이 불필요하고 특히 Snubber 회로 Gate drive unit는 다소 복잡하나 GTO가 체적이나 중량면에서 거의 1/2 정도 감소되기 이므로 소형, 경량화가 가능하며 점착계수의 향상으로 가속도 향상이 가능함으로 전기기관차를 중심으로 확산되어 가고 있는 추세이다.

3) 최근 추진시스템의 적용사례

세계 고속철도중 최고속도를 자랑하는 프랑스의 TGV System은 전류형 인버터 (Current source inverter)를 사용하여 교류동기형전동기 (AC Synchronus moter)를 구동하는 방식으로 열차편성은 2L+10T 방식으로 TM용량 1,100KW, 총 8,800KW로 구동된다. 그러나 최근 프랑스도 ICE나 신간선과 같이 유도전동기를 구동하는 Iverter System을 개발 TMST유러터널에 적용했다.

IV. 최근 Propulsion system 기술동향

1. 분산형 인버터시스템의 개발과 IGBT 적용

최근 일본이나 유럽의 전기철도차량의 가장 큰 변화는 신형고주파 GTO나 IGBT를 활용한 분산형 시스템 (individual control system)의 개발이다.

중전 1C8M, 1C4M 방식의 제어방식에서 1C1M, 1C2M 방식의 소형 인버터시스템의 장점은 첫째 소형경량화의 달성이다, 중전 1C4M 인버터의 약 80% 정도의 공간에 약 60% 정도의 중량을

차지하며 GATE ALLEY채용으로 제어기판수가 1/2로 적어지며 전해콘덴서의 사용과 GTO 차단기 사용에 의한 보호회로의 고속도차단기의 미사용과 소형 F1의 사용 및 Heat pipe 방식과 냉각시스템이 가능한 system이다.

둘째 저소음화의 실현목적이다, 고주파 GTO의 채용과 IGBT의 사용에 의한 스위칭 주파수의 up으로 자기음을 감소시키며 Pulse Mode를 7~9단계에서 2, 3단계로 변경하여 자기음을 줄이고 있다.

특히 중전 GTO는 최대 500Hz 스위칭이 한계였으나 IGBT를 사용하여 2~3KHz 고주파화 하여 Motor의 전자소음을 20db 이상 감소시키며 1축당 10~20% 정도 고출력화 할 수 있게 되었다.

다만 이 System은 아직까지 소자의 한계로 입력단에 GTO Chopper 회로가 필요하다.

| 구 분 | 변 조 방 식 | AS 주파수 |
|------|-----------------------------------|-----------|
| 일 반 | AS, 45P, 27P, 15P, 9P, 5P, 3P, 1P | 1.5Hz까지 |
| 저소음화 | AS, A5P, 11P, 7P, 3P, 1P | 10Hz까지 확장 |
| 최 근 | AS, 5P, 3P, 1P | |

세제 높은 확장성과 maintenace free화 이다.

1 Motor 1 Inverter이기 때문에 1 Motor 단위로 Cut Out이 가능하여 고장시 주행성능 저하의 최소화는 물론 4개모터 제어시 1축의 공전이 다른축 모터전류에 영향을 주므로 제어가 복잡한 반면 분산제어는 개개의 독립된 인버터 주파수에 의해서 1축 단위 재점착제어가 가능하며 Motor측에서 차륜경(Wheel diameter) 관리가 필요없어지며 단류기 이외의 가동부가 없어서 점검개소가 적어지고 소형 인버터 단위 교체가 용이하게 된다.

셋째 고점착제어와 Running Cost의 절감목적이다.

분산제어는 초퍼시스템이 16% 정도의 점착계수인데 반해 1C4M의 18~20%이나 20~23%의 목표기대 점착계수 성능을 얻을 수 있으므로 1Motor 단위의 개별제어를 통하여 종래의 4축 일괄제어와 비교하여 재점착제어가 빠르고 우수한 승차감 확보가 가능한 System이다.

일본의 Toshiba는 300계용 신형신간선에 분산제어방식을 적용(4500V-500A 소형 고주파 GTO)하여 경량화, 저소음화, 승차감 향상 및 종전 C/I 박스가 기기차체 중앙에서 각 대차(bogie) 부근에 2개 모터분의 인버터를 배치하여 3상 출력선을 모터까지 최단선으로 배선이 가능하며 유도장애에 유리하며 GTO 스위칭 전류가 4개 모터제어에 비해 1/4(peak 400A)로 작아서 인버터에서 peak 누설자속이 대폭 저감되어 종전 GTO 스위칭시 1,500A에 이르는 누설자속에 의한 직달노이즈의 감소로 유도장애에 유리한 시스템을 개발 시험중이다.

<1C4M과 1C1M 분산형 시스템의 비교>

| 구 분 | 1C4M | 1C1M 분산형 | |
|-----------|----------------|----------------------|-------------------------|
| 개발 년 도 | 1982년 | 1990년 | |
| 구 동 전 동 기 | AC Motor | AC Motor | |
| 특 성 | 점착계수 | 18~20% | 20~23% |
| | Slip 주파수 | 약 2.5% | 1.3% |
| | Pulse Mode | 7단 | 2~3단 |
| | Motor | 고Slip Motor(효율 90%) | 저Slip Motor(효율 93%) |
| | GTO 소자 | 4.5KV 2500-4000A(6개) | 4.5KV 500A(24개)(1S1P6A) |
| | 공전(WHEEL SLIP) | 발생가능 | 1C1M으로 즉시 재점착 |
| 유지보수 | 유접점수 | 4 | 2 |
| | Print 기관 | 16매 이상 | 8매 정도 |
| | 입력 Filter | 필요 | - |
| | 평활 Filter | 필요 | - |
| | 차륜경 관리 | 필요(차량 1대) | 불필요 |
| | 고장시 Cut Out | 1C고장시 4M 정지 | 1C고장시 3M 정지 |
| 에너지절약 | 전장품 경량화 | 100% | 약 60% |
| | System 효율(역행시) | 85.3% | 88% |
| | 냉각방식 | 대형 Heat pipe 강제냉각 | 소형 Heat pipe 자연냉각 |
| | Inverter 변조율 | 93% | 97% |
| | F1 Loss | 50KW | 30KW |
| | INV Loss | 15KW | 14KW |
| | F1 누설자속 | 약 50 Gauss | 약 10 Gauss |

※ 역행최대 “축출력 1250KW기준” (200KW/Motor)

2. GTO Stack 냉각방식의 변화

일반적으로 반도체소자 냉각용 냉매로는 물, 일산화탄소, 암모니아, 메칠클로라이드, 프레온 (Freon, Dupont의 TM) chlorofluorocarbon(FCs) R113, 오일등이 보편화 되어왔으나 1987년 Montreal protocol에 의해 오존층 파괴를 이유로 금지된 프레온 대신 Fluorinert가 3M사에 의해 개발되어 최근 널리 사용되는 추세이다.

냉각매체의 화학적 성질로는 안정성, 무해성이 있어야 하고 부식과 인화의 위험이 없어야 하며 열전달계수와 전기저항이 커야하는 조건이 있어야 하며 fluorinert는 친오존성이고 파괴적인 염소와 브롬을 함유하지 않고 불활성이기 때문에 매우 안전하다.

유럽의 전기차량에 있어서 반도체소자의 냉각방식은 순수공냉식, 라디에터강제공냉식, R113공냉식, Oil Capsule Cooling, Oil Immersion cooling System으로 냉매는 R113과 냉각수, Oil이 많이 사용되어 왔으나 Oil 냉각방식은 다이캐스팅이 된 특수용기를 포함하여 소자교체의 복잡성의 문제점이 있다.

R113은 종전 가장 이상적인 냉각방식으로 소위 Vapor cooling 방법이라고 하며 fluonide hydrocarbon(FHC)을 많이 사용한다.

또한 최근에는 Heat pipe 방식도 많이 사용되고 있으나 전기기관차를 많이 사용하는 유럽에서는 아직도 Oil 냉각방식을 많이 사용하고 있다.

반도체 소자의 이상적인 Vaporization 온도는 70~75℃이며 Oil capsule cooling 방식이 약 50% 정도이며 Oil capsule cooling 방식으로 이 Oil immersion 방식은 고신뢰도를 유지하는 반면 소자 교체가 복잡한 점이 있으며 또 하나는 evaporation bath cooling으로 냉각팬에 의해 냉각시키는 방식이다.

일본의 경우는 fluorinert가 보편화되어 있으며 종전의 Closed type에서 Open type으로 최근에는 Heat pipe 방식으로 급격히 전환되고 있다.

일반적으로 GTO 소자 열방사가 500W 이하는 자연냉각, 1200W 이하는 강제공기냉각, 오일냉각 또는 오일순환식, fluorinert evaporative cooling 자연냉각방식을 사용하며 3000W까지는 fluorinert evaporative cooling with forced air type이 700W까지는 Heat pipe 자연냉각방식, 1500W까지는 Heat pipe 강제냉각방식을 사용한다.

Heat pipe를 이용하는 냉각유니트는 open type과 비슷한 장점을 가지고 있으며 폐쇄형의 30% 정도 냉매를 사용하며 경량화의 이점이 있다.

3. 견인전동기의 중량 경량화

전기차량의 고속화와 성능향상에 따라 견인전동기로 대용량화 추세로 발전되었다. 이것은 전체 시스템 개선과 개개의 장치 및 구성품 개선을 통하여 얻어질 수 있는 고조파 전류 high harmonic current에 의해 발생하는 전자기파 잡음감소(electromagnetic noise)와 중량감소를 필요하게 된다.

인버터제어 전기차량의 주행특성(속도-전인력곡선)은 통상 정토크 영역과 정출력영역, 특성영역으로 나누어지며 견인전동기 설계자는 특성영역에서 정토크 허용을 할 수 있는 누설리액턴스(주행특성상 토크와 실속 토크의비)고정자 코일의 권선수 및 V/f비가 일정 종속도 영역에서 과여기 되지 않도록 각부의 자속통로의 횡단면 등을 결정해야 하며 특성영역에서 소요토크 여유를 확보하고 코어사이즈를 최소화 하기위한 V/f 패턴의 설정과 정출력영역에서 전압상승을 통하여 최적설계가 필요하다.

인버터 고조파 주파수와 견인전동기 프레임의 고유진동수 일치에 의한 공명음의 억제, 고조파에 의한 전자기음의 억제로 인한 소음감소와 고정점착제어가 주요개발 대상이 되고 있다.

최근 신간선의 경우는 Aluminum bracket를 사용하고 stator core frame을 노출시켜 경량화를 꾀하고 Maintenance free operation을 위하여 bearing과 dust intrusion 억제에 기술개발을 집중하고 있다.

V. 한국 철도청 과천시 지하철 전기동차의 적용사례

세계적인 철도차량의 Propulsion system 변화와 발맞춰 철도청은 '94년 개통한 과천시 및 분당선 차량에 국내최초로 PWM GTO Converter & VVVF Inverter drive AC Asynchronous motor system을 지난 '91년부터 추진 도입하였다.

이 차량은 일본이 지난 '79년 입안후 '90년에 실용화한 최첨단 Nozomi 차량과 동일한 시스템으로 Control system을 설계납품한 일본의 Toshiba, Mitsubishi와 국내업체가 공동설계한 차량으로 4,500V 3,000A급 GTO 소자를 사용하고 Heat pipe with force air cooling type으로 3Φ 유도전동기 200KW×4대 /량으로 6량 편성 2,400KW, 10량 편성 4,000KW의 출력으로 가속도 3.0Km/h/s, 감속도 3.5Km/h/s의 AC, DC공히 Regenerative braking을 시도한 차량이다.

이 차량은 철도청의 Maintenance free화 정책에 의해 경량화, energy 절약과 승차감 향상을 목표로 고밀도 수도권 통근형으로 개발된 차량이다.

이 system은 지난 '93년 4월 과천시 개통시에 운용되었으나 Static Inverter의 입력전원을 Converter에 직결한 회로구성에서 SIV Interface 문제로 초기장애를 일으켰으나 현재 특별한 문제없이 운용되고있다.

향후 개선해야할 사항으로는 Maintransformer에서 800~1KHz대역 소음과 AC Traction motor의 3KHz 대역의 가청주파수 소음의 감소문제와 C/I Box의 forced air cooling에 따른 차고내에서 소음문제 등을 개선하고자 한다.

국내최초 301L 계열 stainless steel 사용에 따른 차체경량화와 복잡한 소음문제는 향후 고속전철의 운용시에도 참고하여야 할 사항이다. 터치스크린 첨단 Information System 등을 적재한 이 차량은 국내철차업계의 기술향상에 기여 하였음을 자부하며 이미 핵심 C/I는 국내업체에 의해 국산화가 추진되고 있다.

VI. 결 론

전기철도차량의 Propulsion system의 기술동향은 소형 경량화, 대출력과 Compact한 Control system을 여러면에서 향후 개선해야 할 점을 안고있다. 따라서 새로운 Inverter system에 의한 학계와 민간기업의 적극적인 기술협력이 필요할 것이다.

아직까지 회생제동의 안정화, 점착성능의 향상, 제어용량의 대용량화, 장치의 소형 경량화, 소음경감등 전기철도 시스템을 개발하려는 이들이 해결해야 할 과제이다.

Total system으로서 철도차량은 Propulsion system 이외에도 집전장치(Pantograph등), 주행장치(bogie) 차체, 선로, 신호시스템 등과 함께 복합적으로 연구 개발 되어야 할 것이다.

◆ 政府 施策 ◆

勞使紛糾로 인한 애로기업 지원 및 확인요령 공고

－ 紛糾피해업체 긴급운영 資金지원 －

정부는 勞使紛糾와 관련해 자금압박을 받고 있는 기업에 긴급운영자금을 지원키로 하고 애로기업에 대한 지원 및 확인요령을 일부 수정, 공고(상공자원부 공고 제 1994-83호, 1994. 8. 3)했다.

상공부는 이 공고에서 자체분규 없이 모기업 또는 관련기업의 노사분규로 자금압박을 받고 있는 기업과 특별한 자체 귀책사유 없이 노사분규가 발생해 어려움을 겪고 있는 기업의 임금체불 및 부도우려에 대비해 긴급운영자금을 지원키로 했다.