

철도차량용 추진제어장치의 기술동향

서 광 덕

(현대중공업(주) 기술연구소 선임연구원)

1. 서 론

최근 산업 발달과 더불어 증가하는 운송 물량과 일일 생활권의 확대 및 생활 수준의 향상으로 인해, 빠르고 편리하며 안전한 양질의 운송수단에 대한 요구가 점차 높아지고 있다. 이러한 요구의 증대는 자동차와 같은 개별적 운송수단의 증대를 유발하였으며, 기존의 제한된 도로에 대한 운송수단의 점유율을 증가시켰다. 그 결과, 운송소요시간이 불규칙해져 평균수송량이 감소했으며 이로 인해 운송효율이 급격히 저하되었다.

따라서 많은 양의 물량을 한 번에 수송할 수 있으며, 정확한 운송시간을 보장하는 철도차량과 같은 운송수단의 확대가 절실하게 되었다. 도심 내에서는 전기 철도차량인 지하철을 설치하여 점증하는 수요를 충족시켜 왔으며, 도심간에는 기존의 궤도를 이용하는 차량의 운송횟수를 늘려 운송량을 증가시켜 왔다. 그러나 최근, 계속된 수요의 증가로 인해 기존 방식의 철도차량 운송 능력도 포화상태에 이르게 되었다. 이에 따라 기존의 제한된 선로에서 운송량을 향상시키기 위한 연구와 함께 새로운 철도노선 확장 및 차량의 고속화를 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

1.1 추진 시스템의 변천 과정과 연구 동향

효율적인 운송 능력의 향상을 위한 방법으로는, 높은 가속 능력과 고속운전 능력을 이용하여 운송시간을 단축시키는 방법에 대한 연구가 집중적으로 수행되어 왔다. 그 결과 동력발생 효율과 유지보수성이 낮은 디젤 기관은 전력전자 기술의 발달에 힘입어 견인전동기와 전력변환장치로 대체되었다. 초기에 적용된 직류전동기와 초퍼로 구성된 견인부는 기존의 동력부에 비해 시스템 효율을 매우 향상시켰다. 그러나 제어기술의 부족 및 전력변환 장치가 각종 접촉기로 구성됨으로써 제어가 불편하여 부하변화에 따른 우수한 견인력 제어를 할 수 없었다. 또한 직류 구동시스템

은 기계적인 구조상 고속운전이 어려웠으며 빈번한 보수가 필요하여 운송능력을 크게 향상시킬 수 없었다.

이런 가운데 최근에는, 대용량 전력용 반도체 소자의 개발과 디지털 신호처리기와 같은 고성능 마이크로 프로세서의 발달에 힘입어 유도 전동기를 사용한 고성능 견인력 제어 시스템이 가능하게 되었다. 그래서 직류전동기와 초퍼는 유도 전동기와 정지형 가변속장치인 VVVF 인버터로 대체되었다. 이러한 교류 구동 시스템은 간단한 구조로 인해 소형·경량화가 가능하고, 높은 신뢰성 및 유지보수성을 가지기 때문에 차량의 고속운전이 가능하게 되었다. 아울러 견인부의 구동력 발생 비를 증대시킴으로써 높은 가속 능력을 가질 수 있는 효율 높은 시스템 구현의 가능성을 보였다.

교류 구동시스템의 적용과 아울러 철도차량 추진 시스템의 연구는 한층 성숙되었으며 다음과 같은 두 분야로 크게 나뉘어 진행되고 있다. 하나는 차량의 경량화와 더불어 단위 견인력 발생 능력을 향상시킬 수 있으며 견인력 발생 효율을 향상시킬 수 있는 견인력 발생부의 배치 및 추진 시스템의 구성에 관한 연구이고, 또 하나는 운행효율을 증대시킬 수 있는 견인력 발생 형태와 우수한 견인 전동기 제어기술 그리고 단위 발생 견인력의 증대와 차량의 경량화에 따라 최근 중요성이 증가된 점착제어를 활용하여 발생 견인력을 최대한으로 활용하기 위한 견인력 제어방법에 대한 연구이다. 이러한 연구동향 가운데 추진시스템 제어기술의 일부와 전력 변환장치의 구성 동향에 대해 개략적으로 설명하고자 한다.

2. 추진용 장치의 제어기술동향

2.1 견인력 제어기술의 동향

철도차량 추진시스템의 견인력 제어는 그림 1과 같이 일반적인 산업용 전동기의 토오크 제어형태와 유사하게 이루어진다. 그러므로 외형적으로는 일반 산업용 전동기 구동기술을 적절히 활용할 수 있다. 그러나 철도차량 시스템 특수성에 따른 우수한 견인력 제어를 위해서는 다음과 같은 기

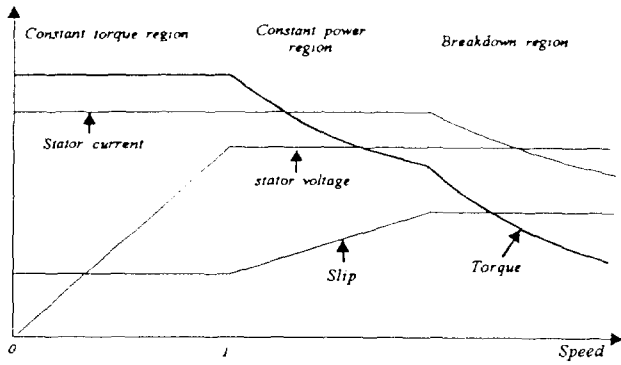


그림 1. 속도-견인력 제어 특성 곡선

술이 보완되어 져야 한다.

그것에는 고속운전과 전 범위에 걸쳐 고효율 운전을 하기 위한 전동기 제어 기술[1]과, 둘째 승차감과 밀접한 관계가 있는 가속도 변화를 최소화할 수 있는 견인력 제어 및 자속제어 기술[12], 셋째 공전 및 활주에 의한 기계적 손상 및 승차감, 견인효율의 저하를 방지하고 최대 점착력을 활용할 수 있는 점착 제어기술[9], 넷째 대용량 전력용 반도체 소자를 이용한 인버터 제어 및 시스템 운영 기술[10], 다섯째 전동기 병렬운전 토오크 제어기술[2] 등이 있다.

철도차량의 추진은 대체로 장거리 화물열차를 제외하곤 제어차에서 요구된 가감속 지령에 의한 토오크 제어에 의해 그림 1과 같이 속도에 따라 세 가지의 운전모드를 가진다. 이것은 초기 가속특성을 결정짓는 정토크 운전영역과 중속영역에서의 가속특성을 결정하는 정전력 운전 영역, 그리고 최대 운전속도 및 고속운전 특성을 결정하는 특성운전 영역으로 나뉘어진다. 정토크 운전 영역은 대체로 초기 정가속 운전 특성을 가지기 위해 표정속도 요구치까지 설정되며, 특성영역은 최대 요구속도와 고속 운전 영역에서의 부하특성에 의해 설정된다. 이때 시스템의 운영방법에 따라 각 운전영역의 설정이 달라지며, 각 운전 영역에서 최대 전동기의 능력을 활용할 수 있는 방법이 필요하게 된다. 중속이상에서의 가감속 능력은 시스템의 용량에 의해 한계 되어 지므로 주어진 용량에서 최대의 가감속 능력을 가질 수 있는 방법이 필요하며, 속도에 반비례하는 자속감소제어에 의한 견인력 제어를 탈피한 견인력 제어방법을 수행함으로써 고속운전 능력을 한층 증대시킬 수 있는 연구가 필요하다[3]. 위의 항목중 견인력 제어에 직접적으로 관련이 있는 두 가지 항목에 대해 살펴보면 다음과 같다.

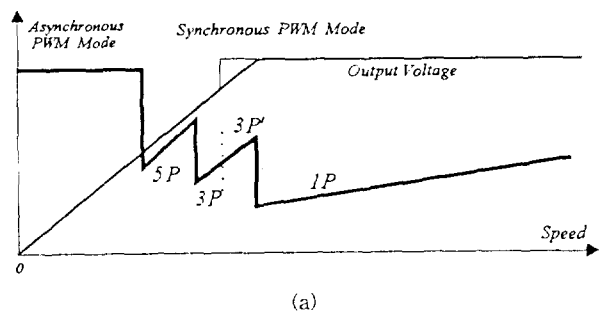
2.2. 견인력의 리플 저감 제어

차간진동 및 승차감 저하를 발생하는 주원인인 견인력의 리플은 다음 세 가지에 의해 발생할 수 있다. 첫째는 근원적으로 전동기 전류의 리플에 의한 성분이고 둘째, PWM 발생 모드 전환에 따른 리플 셋째, 점착력의 순시 변동에

의한 것이다. 첫번째 것은 차체의 진동으로 전달되지는 않지만 전동기 동 시스템 손실을 증가시킨다. 이는 인버터에 사용된 대용량 전력용 반도체 소자의 스위칭 한계로 인해 좌우된다. 그러나 낮은 스위칭 능력에 대해서도 전류의 고조파분이 최소가 되는 최적의 PWM발생방법 연구[4] 및 전류제어 방법 연구 그리고 출력필터 설계 방법에 대한 연구가 진행되고 있다.

보통 가변속 장치는 기본 출력 주파수가 백 수십Hz까지 운전하게 된다. 이때 낮은 스위칭 능력 때문에 출력 주파수의 증가에 따라 출력 전류에는 저차 고조파가 함유된다. 따라서 임의의 주파수 이상부터는 동기 PWM방식이 적용되어야 하며 이러한 동기 PWM방식도 주파수의 증가에 따라 출력 발생의 한계로 인해 그림 2와 같이 모드를 달리하게 된다. 이때 출력 제어의 최대 한계는 전력용 반도체 소자의 최소 턴 온/오프 보장 시간으로 인해 나타난다. PWM모드 전환의 경우 순시 발생 전압의 크기는 물론 위상의 연속이 이루어지지 못한다면, 출력 전류는 과도상태를 가지게 되고 견인력에도 영향을 주게 된다. 특히 그림 2와 같이 3펄스 모드에서 1펄스 모드로의 변화시에는 입력 가선전압에 따라 5%~8%의 불연속 전압을 가지게 됨으로써 전동기의 자속 및 견인력 제어에 악영향을 미치게 된다. 이로 인해 광역 3펄스 모드가 적용되기도 하였으나 완전 연속백터를 기준 아날로그 및 디지털 로직 구성 시스템으로 구현하기는 어려워 적용을 억제하고 있다. 그러나 최근 고속 프로세서 기술의 도입으로 PWM 발생을 완전 프로그램화하여 연속백터를 실시간 제어할 수 있게 됨으로써 광역 3펄스를 도입하여 전압의 연속 제어성을 보장하기 위한 연구가 진행되고 있으며, 아울러 모드를 최소화하는 방향으로 연구되고 있다.

견인력 리플발생의 세번째 원인은 점착력 변동에 따른 바퀴의 미끄럼 때문에 발생하는 공전과 활주에 의해 일어난다. 다음은 공전과 활주시 견인력의 안정된 제어를 위해 견인전동기의 토오크제어를 수행하는 점착제어에 대해 서술한다.



(b) 동기 3펄스 변조 (c) 광역 3펄스 변조

그림 2. PWM 발생 패턴

2.3 점착제어

철도차량의 견인력은 바퀴와 레일 사이의 마찰력에 의해 차체에 전달된다. 따라서 바퀴와 레일 사이의 마찰력은 차량의 견인 특성을 결정하는 주요한 요소가 된다. 그림 3에서 보듯이 이러한 마찰력은 차량속도에 대해 감소하는 한편 바퀴와 레일의 차이속도(공전속도)에 비례하여 급격히 감소하는 특성을 보인다. 그러므로 마찰력이 견인력보다 작은 경우 바퀴는 미끄러지게 되고 견인력이 급격히 감소할 뿐만 아니라 심한 소음과 전달 견인력을 비안정적이게 하여 승차감을 급격히 저하시키게 된다. 그러므로 차체의 경량화로 마찰력은 상대적으로 감소하고 견인부의 단위 견인력이 증대하였지만 이러한 공전 발생빈도가 훨씬 높아져서 기대되었던 견인능력의 향상은 한계에 부딪혔다.

그러므로 운송능력의 증대를 위한 가감속 능력 향상 및 고속화를 위해서는, 견인부의 동력 발생 성능의 향상과 더불어 공전제어를 빠르게 수행하면서도 마찰력에 의한 견인력 전달 제한치인 최대 점착력을 충분히 활용할 수 있는 견인력 제어방법이 절대적으로 필요하다. 최근의 견인력 제어연구에는 이러한 점착제어에 관심이 집중되어 있으며, 다음과 같은 견인력 제어특성을 가지기 위한 연구가 수행되고 있다. 첫째, 최대 점착력 이용률을 한층 증가시키며, 공전에 의한 기계적인 손상 및 소음 발생과 차간진동 등에 의한 승차감과 차량의 안정성 저하를 방지하기 위한 마찰력 변화에 따른 순시적인 재점착 제어를 수행하며, 둘째 시스템 외란 및 센서오차와 각종 제어이득, 시스템 상수의 변화에 대해 강인한 견인력 제어특성을 가지도록 한다. 이러한 견인력 제어기의 구현을 위해서는 점착력 특성 및 한층 향상된 전력전자기술의 응용과 점착력 상태에 따른 견인력 제어를 수행할 수 있는 현대제어이론의 적용 및 고성능 프로세서의 접목이 필요하다.

이러한 점착제어에 관한 연구는 80년대초 견인부가 교류 구동시스템으로 바뀌면서 본격적으로 시작되었다. 초기의 점착제어는 주로 공전발생의 제거에 중점을 두고 연구가

진행되었다[5]. 즉, 마찰력의 변화로 공전이 발생하면 견인력을 완전히 제거하거나 혹은 미리 설정된 패턴에 의해 공전이 소멸될 정도의 작은 크기로 감소시키는 단순한 원리에 의한 공전검지 및 패턴에 의한 점착제어를 수행하였다. 그러나 최대 점착력에 비해 훨씬 적은 구동력으로 제어됨으로써 견인력의 손실이 많았다. 또 마찰력 변화에 따른 순시적인 재점착 제어가 아닌 공전 검지에 의한 재점착 제어가 수행되었기 때문에, 공전검지의 지연 및 검지오차로 인한 특성 저하가 많았다. 뿐만 아니라 공전의 반복 발생시에는 견인력의 리플이 과도하여 승차감을 극히 저하시켰다.

80년대 중반부터 견인효율의 증대에 관심이 모아지면서 공전제어는 물론이고 공전제어시 발생하던 견인력 감소를 최소로 하기 위한 재점착 제어기법이 제시되었다. 견인력을 최대로 전달할 수 있는 최대점착력의 최적 공전속도로 공전속도를 직접 제어하는 클립속도 제어방법[6]과 공전속도에 비례하는 재점착력을 발생하는 공전속도 궤환제어[7]에 의해 순시적인 견인력 제어를 수행하였다. 그래서 마찰력 변화에 대해 지연없이 최대점착력점에서 견인력 전달 특성을 가질 수 있도록 하였다. 그러나 이들은 공전속도에 의해서만 재점착 제어를 수행하기 때문에, 공전속도의 취득오차에 의한 제어특성의 저하가 많이 발생하였다. 실제로 공전속도를 취득하기 위해 필요한 차량속도는 정밀한 센서를 사용하지 못하기 때문에 많은 외란성 오차를 가지게 된다. 최근에는 차량속도를 정확히 추정할 수 있는 방법에 관한 연구와 차량속도의 취득없이 다른 변수로부터 점착력과 공전속도를 추정하여 제어함으로써 손실이 적으며 리플이 적은 견인력 제어를 수행할 수 있는 점착력 추정에 의한 순시 견인력 제어 방법이 연구되고 있다[8]. 이와 함께 견인 전동기 제어 기법으로는 기존의 슬립과수 제어기법에서 점착제어기법의 중요성과 견인력 제어의 향상이 필요함에 따라 벡터제어 기법을 적용하기 시작하였다. 복수 병렬 구동인 경우 완전한 벡터제어 특성을 얻을 수는 없지만 기존의 제어방법에 비해 우수한 견인력 제어특성을 얻을 수 있다. 이와 함께 견인 전동기 제어성의 향상을 위해 인버터와 견인 전동기의 구성을 단독제어방식으로 바꾸어 적용하기도 한다.

3. 전력회로의 기술동향

철도차량 견인부는 보통 1대의 대차(bogie)에 두대의 견인 전동기가 접속되고 1량의 동력차에는 두대의 대차가 접속된다. 이러한 견인전동기는 교류 가변속 장치에 의해 구동되는데, 가변속 장치와 견인전동기의 전력회로 구성방법은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 하나는 한 대의 가변속 장치로 다수대의 견인 전동기를 구동하는 ICMM(1 Converter Multi-Motor drive) 방식이고, 또 하나는 한 대의 가변속 장치로 한 대의 견인 전동기를 개별로 제어하는 ICIM (1 Converter 1 Motor drive)방식이다. 구성별 장단점과 특징을 요약하면 다음과 같다.

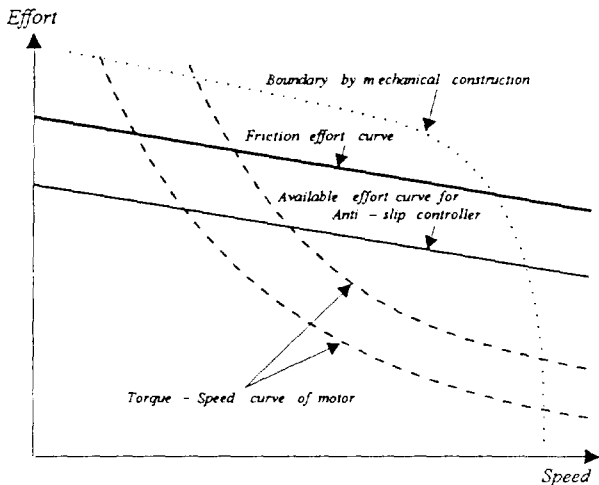


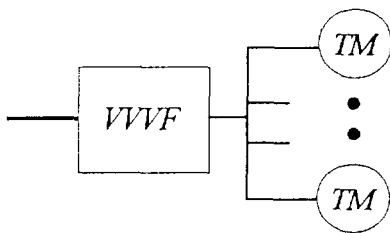
그림 3. 견인력 전달특성

3.1 ICMM 방식

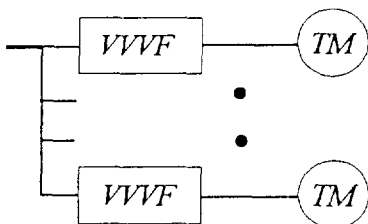
이 방식은 4대 혹은 8대의 견인 전동기를 한 대의 인버터로 구동하는 방식이다. 이 인버터는 보통 수 MW급의 대용량이기 때문에 전력용 반도체 소자도 GTO 싸이리스터로 사용이 제한되며 대개 4500V 3000A급의 GTO가 사용된다. ICMM 방식은 시스템을 간략하게 구성할 수 있으므로 유지보수성이 우수할 뿐 아니라 간략한 회로의 구성으로 구성 비용이 절감되며 설치공간도 감소된다. 그러나 GTO 싸이리스터의 스위칭 능력의 한계로 출력 제어성이 다소 떨어지게 된다. 뿐만 아니라 일반적으로 철도차량 시스템에서 나타나는 부하 동작점의 불평형 즉, 바퀴 반경의 차이 및 전동기 상수의 차이, 점착력의 차이에 대해 개별제어를 할 수 없기 때문에 효율 높은 견인력 제어를 할 수 없다. 그리고 전동기 점착력 변동은 다른 전동기의 동작에 영향을 주게 된다. 인버터의 출력 전류는 일정하게 제어되더라도 전동기의 입력전류는 서로의 점착조건에 따라 변동하여 다른 전동기의 자속과 토크를 흔들게 되고 이러한 상호간섭은 견인력 전달축과 차체에 나쁜 영향을 주며 승차감도 저하시킨다. 반면 다수대의 견인 전동기를 동시에 간략하게 제어할 수 있는 장점이 있다.

따라서 이러한 시스템에는 간단한 슬립 주파수 제어 및 실효전류 제어가 사용되며 일반 통근형 지하철 시스템에 많이 적용된다. 그러나 극히 낮은 시스템의 고장 회복율 및 점착 제어성의 저하 등 운행 효율의 증대 방안에 상반된 조건을 점차 많이 갖추게 되어 높은 가속 특성을 갖지 않는 중장거리 운전 열차에 적용이 제한되고 있다. 그래서 최근에는 병렬 구동 추진 시스템으로 IC2M 구성 방식을 많이 적용하고 있다[9].

이러한 방식은 부하특성이 거의 유사하게 나타나는 같은



(a) ICMM 방식



(b) IC1M 직렬 혹은 병렬 접속 방식

그림 4. 전력회로의 구성 종류

대차의 견인 전동기를 한 대의 인버터가 제어한다. 따라서 벡터제어기법과 순시 재점착 제어를 적용할 수 있게 됨으로써 전동기의 자속을 안정하게 제어하며, 빈번한 점착력의 변화에 대해서도 안정된 견인력 제어동작을 가능하게 하였다. 따라서 점착 제어성 및 견인력 특성을 향상시킬 수 있다. 뿐만 아니라 이러한 방식은 IC4M, IC8M에 비해 높은 고장 회복율을 가질 수 있다.

3.2 IC1M 방식

복수 구동 방식은 어떠한 경우라도 완전한 개별 점착 제어를 수행할 수 없으며, 인버터의 고장은 과대한 견인력의 손실을 발생하기 때문에 최근 견인 전동기의 개별운전을 위한 시스템의 구성이 급격히 증대하고 있다. 이러한 시스템의 구성은 인버터의 단위용량 감소로 인해 최근 급격하게 용량 증대를 보이고 있는 고속 스위칭 소자인 IGBT를 사용할 수 있게 되면서 더욱 빠르게 진행되고 있다. 단독제어 시스템은 개별 점착제어를 수행함으로써 우수한 견인력 제어를 구사하며 높은 시스템의 고장 회복율을 확보할 수 있다.

이러한 시스템은 크게 2가지로 연구되고 있다. 하나는 저전압 스위칭 소자인 트랜지스터를 사용한 인버터를 직렬로 사용하여 구성한 시스템[10]이고 또 하나는 IGBT를 이용한 3레벨 인버터를 병렬로 구성한 시스템[11]이다. 첫번째 시스템은 강제공랭식으로 소형 저가로 구성할 수 있다는 장점이 있었다. 그러나 부하 불평형을 입력측의 전압 평형제어용 쇼퍼가 분담해야 하기 때문에 점착제어의 한계를 가진다. 또한 이러한 시스템의 구성은 개별제어의 장점은 있지만 고장 회복율은 낮다. 두번째 시스템은 출력 전류제어성 및 개별제어성이 뛰어나고 고장 회복율이 높다. 따라서 두번째 시스템이 최근 전력용 반도체 소자의 급속한 발달과 더불어 가장 많이 연구되고 있으며, 적용 범위도 점차 넓혀가고 있다. 그러나 시스템이 다소 복잡해지고 제어가 복잡해지게 됨에 따라 고속 프로세서 응용기술이 필요하게 된다. IC1M방식은 높은 가속속도가 필요한 단거리 운전 전동차량에 적용이 확대되고 있다.

4. 결론 및 검토

간략하게나마 전동차량 추진 시스템의 주요 연구내용에 대해 서술하였다. 전동차량의 추진시스템은 중장거리용으로는 대용량의 필요로 인해 여전히 GTO 인버터의 적용이 계속될 것으로 생각되며 전력회로 구성은 견인력 제어성의 향상 및 고장 회복율의 향상을 위해 IC2M방식을 병렬로 접속하여 운전하고 기관차형의 동력집중식이 계속될 것으로 생각된다. 그리고 단거리용 및 경전철 시스템에는 IGBT를 사용한 IC1M 방식과 동력분산식이 적용될 것으로 본다. 그리고 이러한 시스템에는 고성능 견인력 제어기술의 적용 및 시스템 제어의 유연성과 중앙제어장치와의 연계성 향상

그리고 사용자와의 편리한 인터페이스를 위해 고성능 프로세서의 도입이 절대적으로 필요할 것으로 본다.

국내의 전동차량 적용은 초기의 저항제어차, 초퍼를 이용한 직류 가변속 시스템을 시작으로 꽤 오랜 역사를 가지고 있으나 전동차량에 대한 국내 연구는 아주 미약한 상태에 있었다. 그로 인해 국외에서 80년대 초부터 실용화된 VVVF 인버터를 이용한 교류구동 시스템이 국내에는 과천선을 시작으로 최근에만 적용되었으며 시스템 운영기술을 대부분 국외에 의존하고 있다. 그런 가운데 교류 구동시스템은 계속해서 신설노선 및 교체노선에 적용을 넓혀가고 있다.

다행히 현재 고속철도의 도입으로 국내에는 전동차량의 제어기술에 대한 관심과 연구가 급속도로 증대하고 있다. 그러나 이러한 각계의 연구는 독립적으로 추진되고 있으며, 실제 학계와 산업체 그리고 사용자와의 공동체적인 공감대 형성의 저하로 이론 위주의 연구에 머물러 있다. 연구되어진 기술의 비교평가 및 적용을 해보지 못함으로써 실용화 및 성능향상을 위한 연구는 거의 이루어지지 못한 상태이다. 따라서 계속적으로 증가되는 수요에 대해 국외 기술 의존도를 저하시키고 기술독립을 함으로써 수많은 외화를 절감할 뿐만 아니라 체계적인 국내 전동차량 시스템을 갖추기 위해서는, 국내 기술력에 대한 존중이 우선되어야 하며, 산업체와 사용자 측의 과감한 투자가 필요하며 학계와 기타 연구기관과의 체계적인 연구 시스템을 형성해야 할 것으로 생각된다. 이로써 산적해 있는 관련 기술분야인 고속전철, 지하철은 물론이고 경전철 및 자기부상열차 시스템에 대한 국내의 기술 자립이 이루어질 수 있을 것으로 본다.

참 고 문 헌

[1] Lloyd W. McSparran, "Considerations in the Specification of AC Propulsion Equipment for Passenger Vehicles", IEEE/ASME Joint Railroad Conference, pp.95~101, 1993.

[2] P. Gratzfeld, M. Weinhardt, "Improvement of the Dynamic Behavior of A Bogie Drive with Two Induction Motors Fed by A Common Inverter," in *Proc. of Tokyo-IPEC*, pp.1556~1564, 1983.

[3] 김상훈, "약계자 영역에서 유도전동기의 최대 토오크운전," 서울대학교 대학원 공학박사학위논문, 1994, 8월

[4] J. Holtz, A. Khambadkone, "Low Switching High Power Inverter Drive Based on Field-Oriented Pulsewidth Modulation," *EPE Proc. Rec.*, Vol. 4, pp. 672~677, 1991

[5] Shintarou Ohe, Tomoki Watanabe, Kiyoshi Kawaguchi, Shunji Tamoki, "マルチモードブレーキ 滑走再粘着制御", 平成6年 電氣學會 産業應用部門 全國大會, pp.635~638

[6] Hans-Peter Bauer, Rudolf Pfeiffer, Karl Hahn, "Optimale Kraftschlußausnutzung durch selbstadaptierende Radschlupfregelung am Beispiel eines Drehstrom-Lokomotivantriebes", *Elektrische Bahnen* eb.84.Jahrgang, pp.43~57, 1986.

[7] Tomoki Watanabe, Masamichi Ogasa, "すべり速度歸還 トルク制御實現のための課題," 平成4年 電氣學會 産業應用部門 全國大會, pp.5~8.

[8] 서광덕, "점착력 추정에 의한 고능률 재점착 제어," 서울대학교 대학원 공학박사학위논문, 1995, 2월

[9] J.A. Taufiq, "Inverter Propulsion System for Eurostar," *STECH Conf. Rec.*, Vol.1, pp.229~233, November, 1993

[10] Tadashi Tohama, Takahiro Kikuchi, Kazufumi Ishii, "3 Level IGBT Inverter Propulsion Control System," *STECH Conf. Rec.*, Vol.2, pp.249~254, November, 1993

[11] H. Miki, H. Yoshikawa, M. Iwahori, N. Yoshinori, Y. Konishi, "New AC Traction Drive System with Transistor VVVF Inverter," *IEEE Trans. PESC Conf. Rec.*, pp.291~297, May, 1991

저 자 소 개



서광덕(徐光德)

1964년 2월 22일생. 1986년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1991년-현재 현대중공업기술연구소 선임연구원.