

차량추진제어장치에 응용되는 전력전자 및 제어기술

정만규*, 방이석**

(현대중공업(주) 기계전기연구소 *선임연구원, **책임연구원)

1. 서론

최근 산업의 발달과 도시인구 집중현상으로 도시의 교통난은 복잡한 상황에 처해 있다. 수십 년간 도로의 확대는 정체 상태이나 차량 등의 증가는 포화상태에 이르러 대량의 수송 능력을 가지며 정확한 수송시간을 보장하는 지하철 전동차량 운송시스템에 대한 필요성이 대두되고 있다.

현재 국내에 운용되고 있는 도시지하철은 1975년 서울지하철 1호선 개통을 시작으로 향후 도시철도 확충계획에 따라 서울지하철 9호선과 부산지하철 3호선 그리고 대구지하철 2호선 등이 추가 건설계획에 있으며 신규노선인 광주지하철 1호선과 대전지하철 1호선이 2004년 내에 영업운전을 실시할 예정이다. 이와 아울러 신설되는 노선에 대해 운송시스템의 효율을 극대화하기 위해 하남시, 김해시, 의정부시 등에서는 경전철차량의 적용이 추진되고 있다. 이러한 전동차량의 수요증대는 궁극적으로 그와 관련한 기술의 증대를 필요로 한다. 본 고에서는 차량용 추진제어장치에 응용되는 전력전자 및 제어기술에 관하여 기술하고자 한다.

2. 추진제어장치의 국내외 기술 현황

2.1 세계기술 현황

초기 철도 차량에는 직류전동기가 사용되었다. 반도체 소자가 발달하지 않은 60년대는 저항제어 방식이 주류를 이루었다. 점차 반도체 소자가 발달하면서 70년대에 이르러 초퍼제어 시스템이 추진제어장치에 적용되었고, 에너지 절감과 승차감 향상이라는 철도차량발전에 진일보한 성과를 이루었다. 그러나 직류전동기를 견인전동기로 사용함으로써 해서 발생되

는 유지,보수 비용과 시스템의 불안정등 문제점이 여전히 남아 있었다. 80년대말 고전압, 대용량의 역도통 GTO Thyristor 소자의 개발과 VVVF 인버터 제어방식의 적용으로 철도차량에 유도전동기의 사용이 가능하게 되어 GTO VVVF 인버터가 철도차량의 추진제어장치를 선도하게 되었다. 90년대 후반에 급격한 반도체 소자의 발달로 고속스위칭이 가능한 IGBT가 개발되면서 기존소자의 대체품으로 주목을 받게 되었다. 전압구동 소자인 IGBT는 게이트 구동회로가 간단하고 빠른 스위칭에 의한 필터의 소형화와 저소음화로 시스템의 안정성 향상, 소형경량화, 승차감 향상등의 이점이 있었지만 대용량화에 어려움이 있어 철도차량에 사용되지 못했는데, 최근 대용량 IGBT가 개발되면서 신규 제작되는 철도차량의 추진제어장치부터는 IGBT를 채용하고 있다. 표 1에 추진제어 장치의 발달과정을 나타내었다. 추진제어 장치의 제어방식은 60년대에는 저항제어가 주류를 이루었고, 70년대에는 초퍼제어를 패턴제어에 의하여 행하였다. 80년대 중반에 GTO식 VVVF 인버터에 슬립주파수제어가 적용되었다. 90년대 말에서야 최근 기술인 벡터제어 기술과 순시 재점착제어, 32bit 프로세서가 사용되기 시작하였다.

2.2 국내기술 현황

국내 전동기의 추진제어장치는 70년대 저항식 제어에서 시작하여 90년대 하반기 IGBT VVVF 인버터 제어로 발전되어 왔다. 초기에는 국내 기술수준은 GTO VVVF의 경우 주요 부품 수입에 의한 국산화 제작 및 일부기술의 자립을 추진하는 단계였으며, IGBT VVVF 인버터의 경우는 외국으로부터 기술도입을 타진하는 단계였다. 그러나 본사는 자체기술력으로 IGBT형 VVVF 인버터를 개발하여 서울시 6호선에서

2001년도부터 1개를 편성 영업 운행중에 있다.

표 2는 국내에 도입된 추진제어장치와 국내기술 수준을 나타낸다. 현재는 저항제어 차량은 VVVF제어 기술로 변경된 상태이고, 초퍼제어용 차량도 VVVF제어 차량으로 변경될 예정이다. 초기 IGBT VVVF 인버터는 외국기술에 의존한 상태였으나, 광주 도시철도 1호선을 기점으로 국산화된 추진제어 장치가 도입되고 있다.

표 1. 추진제어장치의 발달과정

년 대	'65	'70	'75	'80	'85	'90	'95	2000
반도체기술	1300V 연계회로회로소자	1300V~2500V 연도회로회로소자	2500V~4500V GTO회로소자	6000V 1200V~1400V 관용동장시스템	6000V 1200V~1700V~3300V IGBT			5500V IGBT
추진제어장치 제어기술	아나로그제어	패턴제어(8Bit)	실시간제어 동일구조제어 (16Bit)	순시토크제어 순시토크제어 패턴제어 (32Bit)				
추진제어장치 제어기술	저항제어 점입점제어	초퍼제어 회로소자	GTO 식	3상 VVVF INVERTER(회로소자)	GTO 식	3상 VVVF 인버터제어		IGBT식

표 2. 추진제어장치의 국내적용 현황과 기술 수준

항목	적용 LINE	기술수준
저항제어	KNR 1호선 SMSC 1호선	일부 부품수입에 의한 국산화 제작, 국산화율 90%정도
초퍼제어	SMSC 2, 3, 4호선 부산 1호선	일부 부품수입에 의한 국산화 제작, 국산화율 80%정도
GTO VVVF 제어	KNR 과천, 분당선 SMG 5, 7, 8호선 대구 1호선 부산 2호선	중요 부품수입에 의한 국산화 제작, 국산화율 50%미만
IGBT VVVF 제어 (외국기술)	인천 1호선 SMG 6호선 SMG 7, 8호선 추가	외국기술에 100% 의존
IGBT VVVF 제어 (국내기술)	광주 1호선(국산화) 대전 1호선(미정) 대구 2호선(미정) 부산 3호선(미정) SMG 9호선(미정)	일부 부품수입에 의한 국산화 제작, 국산화율 90%정도

2.3 전력소자 발달과정

그림 1은 추진제어 장치에 적용된 반도체소자의 변천사이다. 70년대에는 다이오드와 싸이리스티가 주류를 이루었고, 80년대말~90년도 초에는 GTO가 사용되었다. 90년대 말에 IGBT와 IGCT에 구동회로를 통합한 IPM이 각광을 받기 시작하였다. 2000년대에 IGCT가 개발되었으나 아직 철도차량 추진제어장치에서는 널리 사용되지 않고 있다.

그림 2는 전력소자별 전압, 전류 용량과 스위칭주파수를 대

략적으로 나타내었다.

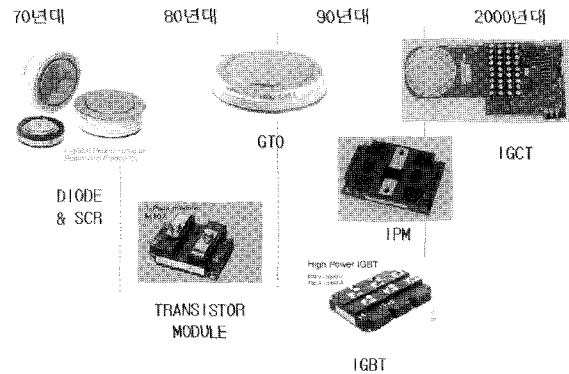


그림 1. 추진제어장치에 사용된 전력소자

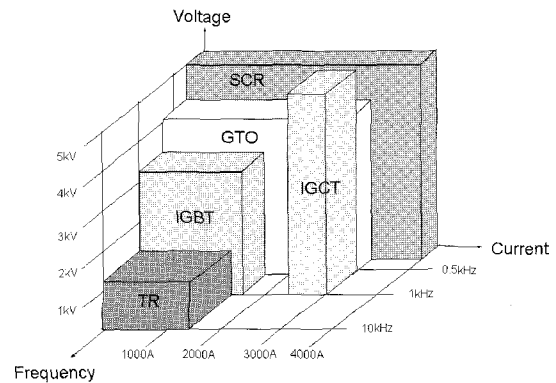


그림 2. 전력소자의 전압, 전류용량 및 스위칭주파수

3. 추진제어장치의 주회로 구성방식

VVVF 인버터의 주회로방식은 1개의 인버터로 2개 또는 4개의 견인전동기를 병렬로 연결하여 제어하는 집중방식과 1개의 인버터로 1개의 견인전동기를 제어하는 개별제어방식이 있다. 개별제어방식은 인버터가 개별적으로 견인전동기를 제어하므로 전동기 사이의 영향이 없으며, 고정밀도 토크 제어가 가능하고 하나의 인버터가 고장났을 경우 고장난 인버터만 분리하여 운전할 수 있으므로 집중제어 방식에 비해 우수한 성능과 안정성을 가진다. 그러나 개별제어 구성에 따른 주회로 구성소자 및 관련부품의 증대로 유지보수가 어렵고, 가격상승이라는 단점이 있다. 반면 집중제어방식은 제어 측면에서 볼 때 제어와 안정성 면에서 개별제어방식보다 불리하나, 주회로 구성이 간단하고 중량 및 부피를 감소할 수 있고, 경제성 측면에서 장점이 있다. 그러므로 IC4M 방식을 채택하여 국내에서는 사용중에 있다. 주 회로 시스템에 대한 각각의 장단점은 표 3과 같다.

표 3. 추진제어장치의 주회로 비교

비교 항목	개별제어방식(1C1M)	집중제어방식(1C4M)
회로 구성	복잡	간단
공전 활주	<ul style="list-style-type: none"> - 한 개의 인버터가 한 개의 전동기제어하므로 한 축의 공전발생은 다른 축에 영향을 주지 않는다. - 독립된 주파수로 각각의 축을 제어하므로 고밀도 토오크 제어가 가능하여 승차감 향상 - 고감도 재접착 제어가능 	<ul style="list-style-type: none"> - 한개의 인버터가 네 개의 전동기를 제어하므로 한 축의 공전이 다른 축의 전동기 전류에 영향을 주므로 제어가 복잡 - 4구동축 단위의 재접착 제어가 되기 때문에 공전축의 토오크제어가 어렵고 재접착 제어시의 토오크 변동이 개별 전동기 방식보다 크다.
차륜경 관리	<ul style="list-style-type: none"> - 각 구동축의 차륜경 관리 불필요 - 전동기가 개별제어 되므로 각각의 회전주파수에 제약이 없다. 	<ul style="list-style-type: none"> - 4구동축간의 차륜경차 관리가 필요(5~10mm 정도) - 4개의 전동기가 같은 주파수에서 운전
가격 유지 보수	<ul style="list-style-type: none"> - 주회로 소자 및 관련부품의 증대로 가격이 상승. - 부품수의 증대로 유지/보수가 어렵다. 	<ul style="list-style-type: none"> - 주회로 구성이 간단하여 가격이 감소 - 부품수의 감소로 유지/보수가 쉽다.
유도 장애	각 대차 근처에 인버터 장치를 배치하므로 3상 출력선이 모터까지 최단 배선이 되어 유도장애 대책상 유리하다.	차체 중앙부에 위치한 인버터에서 전동기까지 3상 출력선이 배선하므로 그 사이에 누설전류가 직접 전달되므로 노이즈 대책이 필요하다.

4. 추진제어장치 전력회로 구성

차량용 추진제어장치는 일반적으로 그림 3과 같이 구성된다. 차량용 추진제어장치는 주전력 변환장치인 전압형 인버터장치와 주변장치로 구성된다.

차량용 VVVF 인버터는 견인 전동기에 가변전압 가변주파수의 전압을 공급하여 요구하는 구동력을 발생하기 위한 교류 가변속 장치이다. 주변장치인 LB 차단기는 인버터장치에 가선전압을 공급 또는 차단하는 기능을 가진다. 정상동작시에 전압을 인버터장치에 공급하지만 고장 발생시 순시적으로 가선전압을 차단하여 시스템을 보호하는 기능을 가진다. 필터리액터(FL)는 가선에 포함된 고조파량을 감쇄시켜 시스템의 성능과 안정도를 향상시키며, 회생저항(DBRe)은 회생시

가선전압이 기준치 이상일 때 동작하여 높은 전압이 일정하도록 하는 기능을 한다.

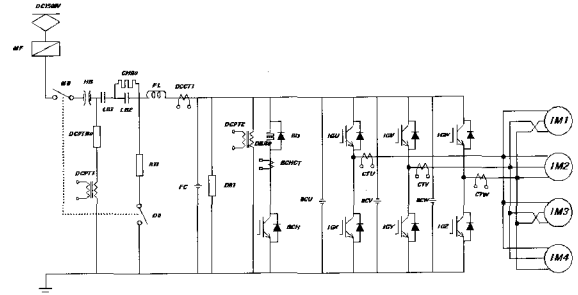


그림 3. 추진제어장치 전력회로 구성

표 4. 전력회로 기호 및 명칭

기 호	명 칭
MF	입력단 퓨즈
HB	고속차단기
MS	주회로 연결 스위치(MDS)
DS	방전스위치(MDS)
LB1, LB2	주회로 차단기
FL	필터 리액터
FC	필터 콘덴서
CHRe	충전 저항
DBRe	제동 저항
DR1	방전 저항
BCH	Braking Chopper
DCPT1,2	직류전압센서
DCCT1	직류전류센서
CTU,CTV,CTW	교류전류센서
SCU,SCV,SCW	스너버 콘덴서
IGU, IGW, IGX	IGBT 모듈
IGV, IGY, IGZ	IGBT 모듈

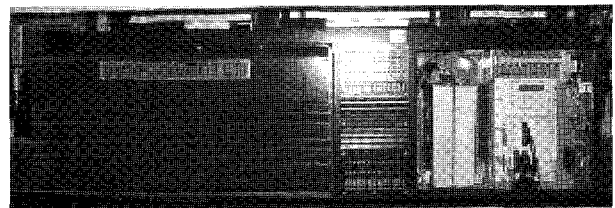


그림 4. 국산화된 광주도시철도 1호선 추진제어장치

5. 추진제어장치 제어기술

추진제어장치에 대한 견인력 제어기법으로는 과거에는 저항제어와 초퍼제어가 사용되었다. 그리고 VVVF인버터 방식에는 슬립주파수제어와 벡터제어가 사용되고 있다. PWM 방법으로는 SPWM, 공간벡터(SVM) 변조기법을 사용하고 있다. 그러나 슬립주파수제어는 토오크 제어의 속응성이 떨어지고, SPWM은 고조파 함유율이 많기 때문에 본 고에서는 이러한 문제점을 제거하여, 최근에 많이 사용되는 공간벡터 방식을 사용한 저주파 동기 과변조 방법 및 병렬운전 벡터제어기법, 그리고 가선전압의 맥동을 제어하는 Beatless 제어와 운송효율 및 승차감 향상을 위한 재점착제어에 대하여 기술한다.

5.1 저주파 동기 과변조 PWM 방법

스위칭 주파수가 수 kHz로 높은 과변조기법은 지금까지 많은 연구가 되어왔다⁽¹⁾⁽²⁾. 그러나 스위칭 주파수가 수백 Hz로 제한되어 응용되는 전동차용 추진제어장치에 대해서는 옹셋 전압과 위상 오차 분이 발생되지 않는 새로운 저주파 동기 과변조 PWM 방법이 필요하게 된다. 본 고에서는 전구간에서 공간전압벡터에 의한 단일화된 과변조 알고리즘을 사용하고 저주파 스위칭으로 가장 간략하게 구현할 수 있는 저주파 동기 PWM 방법을 소개한다⁽³⁾⁽⁴⁾. 여기서 x축은 변조지수 (Modulation index)이고, y축은 스위칭 주파수이다.

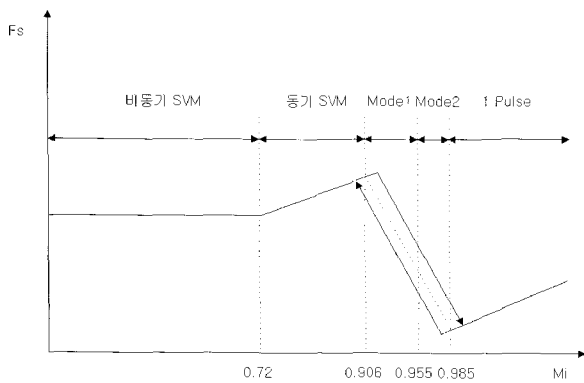


그림 5. 저주파 동기 과변조 PWM 방법

5.2 병렬운전 벡터제어

최근 차량의 경량화 및 견인부의 단위 체적당 출력의 증대로 견인력 제어가 점차 한계에 부딪히는 경우가 빈번하다. 또한 구배 기동을 위한 역상 운전, 입력전압의 변화에 대한 출력제어성 향상과 가선측의 회생전력 수전 한계에 대한 회생량의 제한 제어특성 등 추진장치에 대한 요구도 많아졌다.

따라서 새로운 고성능의 견인력 제어기법이 필요하게 되었다. 본 고에서는 이러한 요구조건을 충족하기 위해 견인력 제어기법으로 벡터 제어기법을 소개한다⁽⁴⁾⁽⁵⁾. 비록 4병렬 운전으로 인해 완벽한 벡터 제어를 구현하기는 어렵지만 상기의 사항들은 주로 저속에서 나타나는 현상이며, 저속에서는 병렬 접속된 전동기의 동작점의 차이가 적으므로 벡터제어 특성을 충분히 얻을 수 있기 때문이다. 그림 6은 견인력 제어 블록도를 보인 것이다. 운전석 마스콘의 토오크 지령치를 벡터 제어를 수행하기 위하여 동기좌표계 d,q축 전류로 변환을 하고, 비례적분 전류제어와 역기전력을 보상한 d,q축 전압벡터를 저주파 동기 과변조 PWM방법을 적용하여 제어한다.

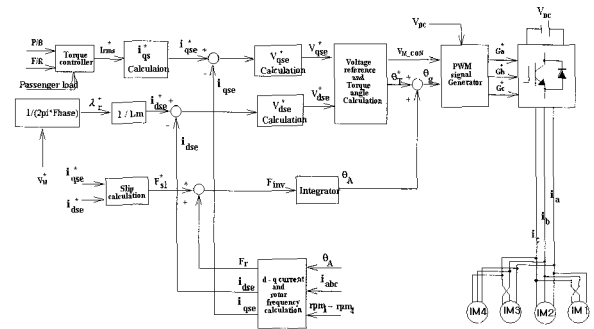


그림 6. 추진장치의 견인력제어 블록 다이어그램

5.3 Beatless(Damping)제어

Beatless 제어는 PWM제어 모드가 동기모드 및 과변조 영역에서 주로 사용된다. 스위칭주파수가 적은 대용량 인버터 시스템에서는 출력 제어 빈도가 낮기 때문에 가선 입력측에 공진 등으로 콘덴서전압에 교류 리플 성분이 있을 경우 그림 6에서 보듯이 출력전압은 1/2 대칭을 만족하기 못하기 때문이다. 스위칭의 게이트 온 시간 T_{ga} 은 다음의 식과 같이 표현할 수 있다.

$$T_{ga} = V_{as}^* \cdot \frac{T_1}{1500}$$

$$T_1 = \frac{1}{2 \cdot N \cdot F_{inv}} \tag{1}$$

콘덴서의 전압에 리플이 과도하게 발생하여 콘덴서 전압이 상승하였는데 T_{ga} 가 보상이 되지 않은 상태로 PWM을 수행하여 출력전압이 1/2 비대칭이 되면, 전동기는 편자되어 인버터에 과전류가 흐르게 된다. 그러므로 스위칭 주파수 T_1 의 주기를 변경하여 T_{ga} 가 보상 되도록 하는 제어가 수행되어야 한다. 보상된 T_1^{\oplus} 는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{ga}^{\circ} = V_{as}^* \cdot \frac{T_1^{\circ}}{1500}$$

$$T_1^{\circ} = \frac{1}{2 \cdot N \cdot F_{inv}^*}$$
(2)

직류전압에서 추출한 교류성분 V_{dc-rip} 을 비례제어기를 사용하여 주파수 성분으로 변환하고 인버터 주파수에 더하여 스위칭 주파수 T_1 의 주기를 조절하는 방법으로 간단히 Beatless제어를 수행한다.

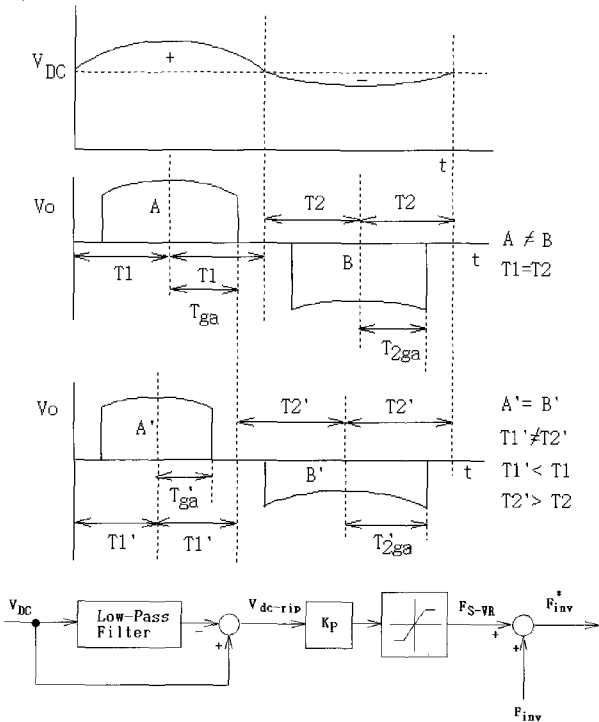


그림 7. Beatless 제어기

그림 7에 Beatless제어기를 나타내었다. 입력전압의 변동분에 비례제어기를 적용하여 Beatless제어기의 출력으로 식 (3)과 같이 계산한다.

$$F_{svr} = V_{dc-rip} \cdot K_p$$
(3)

여기서, K_p 는 비례게인이다.

5.4 재점착제어

재점착제어는 바퀴와 레일 사이의 마찰력이 습기·먼지 등이 물질에 의해 제어 요구 견인력 보다 작아진 경우, 공전을 일으키지 않고 전달 가능한 최대 점착력인 마찰력으로 견인

력을 제어하기 위한 것이다^{[6][7]}.

그림 8은 공전시 재점착제어 알고리즘을 나타내었다. 그림과 같이 공전가속도와 공전속도를 이용하여 공전 감지를 하도록 하였다.

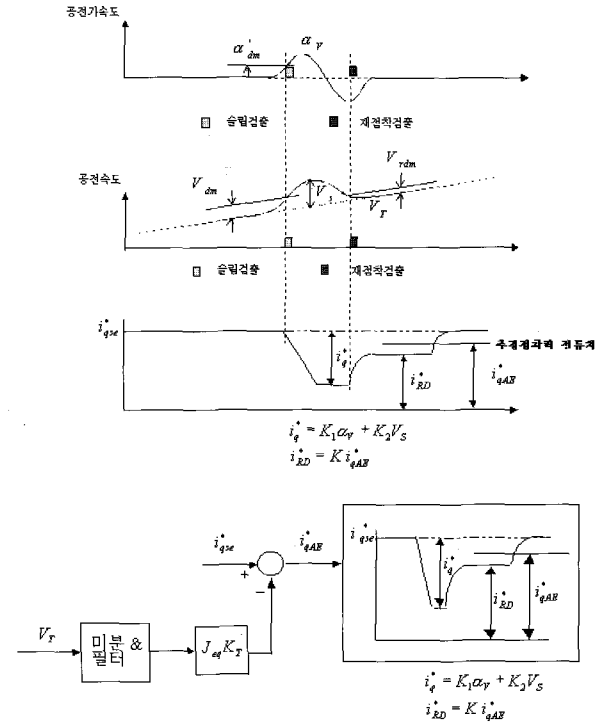


그림 8. 추정점착력에 의한 재점착제어

공전을 감지하면 견인력을 감소시켜 공전이 발생하지 않도록 하고, 재점착이 감지 되면 추정된 점착전류를 이용하여 재점착제어를 수행한다. 전동기의 토크 방정식을 점착력에 대하여 정리하면 식 (4)와 같고, 이것을 전류에 관한 식으로 다시 표현하면 식 (5)와 같다.

$$T_{AE} = T_M - J_{eq} \frac{d\omega_M}{dt} - B\omega_M$$
(4)

$$i_{qse}^* = i_{qcmd}^* - K_1 \alpha_v - K_2 V_s$$
(5)


즉 전동기 토크 지령전류 i_{qse}^* 에서 공전이 발생한 양을 전류로 환산하여 감소시킨다. 감소분 전류 i_q^* 는 식 (6)과 같이 다시 표현 할 수 있다.

$$i_q^* = K_1 \alpha_v + K_2 V_s$$
(6)

여기서 i_q^* 공전에 의한 전류감소치이며, K_1 는 공전가속도 비례계인, K_2 는 공전속도 비례계인, α_v 공전가속도, V_s 은 공전속도이다.

공전속도는 4개 축의 속도를 평균한 속도 V_T 와 슬립(slip)이 발생한 축속도와 차로써 구한다. 공전가속도 α_s 는 공전속도의 시간에 대한 변화량을 저역필터를 사용하여 구한다. 공전이 발생하면 식 (6)과 같이 공전에 의한 전류감소치 i_q^* 를 구하여 토크 전류지령치 i_{acmd}^* 에서 빼주어 i_{qse}^* 감소시킨다. 공전이 소멸되면 재점착 감지에 따라 공전속도 및 공전가속도에 의해서 감소한 전류 i_{qse}^* 를 추정 재점착전류 i_{qAE}^* 의 K배한 재점착전류 지령치 i_{RD}^* 로 회복시킨다. 추정 재점착 전류는 공전이 검지될 당시의 전류량을 이용하여 계산해 둔다. 그리고 일정한 시간이 경과하면 원래의 전류지령치로 회복시킨다.

6. 결 론

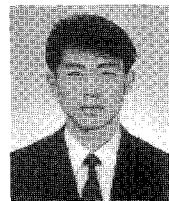
본 고에서는 차량추진제어 장치의 발달과 추진장치에 응용되는 전력전자 및 제어기술에 관하여 논하였다. 현재 국내에는 많은 수의 전동차가 운행 중에 있고, 앞으로도 더 많은 수의 전동차가 필요로 할 것이다. 과거에는 우리가 외국기술에 의존하여 전동차를 운행하였지만 국내 기술로 개발된 전동차 추진제어 장치가 이미 서울시 6호선에 1개 편성이 기증되어 운행 중에 있고, 또한 광주도시철도 1호선에도 이미 국산화된 추진제어장치가 납품되고 있는 시점이다. 신규노선인 대구 2호선, 대전 1호선, 부산 3호선, 서울시 9호선, 서울시 2호선 대폐 차량에 국산화된 추진제어 장치가 장착될 날이 멀지 않았고, 해외 시장도 개척하여 수입대체 효과 및 수출이 가능하게 되었다. 

참 고 문 헌

[1] J. Holtz, W. Lotzat, and A.M. Khambadkone, "On Continuous Control of PWM Inverter in the Overmodulation Range Including the Six-step Mode", Trans. IEEE. on PE, Vol. 8, No. 4, pp. 546~553, 1993.
 [2] 이지명, 이동춘, 최종우, "PWM인버터의 과변조 제어 기법", Trans. KIEE, Vol. 46, No. 5, pp. 712~719,

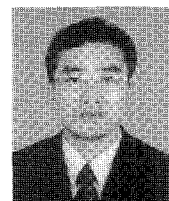
1997. 5.
 [3] K.J. Lee, M.K. Jeong, L.S. Bang, K.D. Seo, and N.H. Kim, "A Study on the High Performance PWM Technique for a Propulsion System of Railway", Proceedings ICPE '98, pp. 425~430, 1998.
 [4] 정만규,서광덕, "관성부하를 이용한 전동차 추진용 VVVF 인버터의 모의주행 및 과도상태시험", 전력 전자학회 논문지, 제4권, 제6호, pp. 491~499, 1999. 12.
 [5] D.W. Novotny and T.A. Lipo, Vector Control of Dynamics of AC Drives, Oxford University Press Inc., New York, pp. 257~268.
 [6] T. Watanabe, A. Yamanaka, T. Hirose, K. Hosh, and S. Nakamura, "Optimization of Readhesion Control of Shinkansen Trains with Wheel-Rail Adhesion Prediction", PCC-Nagaoka ICPE '97, pp. 47~50.
 [7] A. Yamanaka, T. Watanabe, M. Matsuoka, and Y. Imamura, "Application of Anti-slip Readhesion Control with Presumed Adhesion Force to Commuter transport Electric Cars", T. IEE Japan, Vol. 119-D, No. 6, pp. 825~836, 1999.

< 저 자 소 개 >



정만규(鄭萬圭)

1967년 3월 1일생. 1990년 건국대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년~현재 현대중공업(주) 기계 전기연구소 전력변환연구실 선임연구원.



방이석(方利錫)

1963년 1월 22일생. 1986년 명지대 전기공학과 졸업(학사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년~현재 현대중공업(주) 기계전 기연구소 전력변환연구실 책임연구원.