

고속 전철 견인용 교류 전동기의 제어 방식

오 성 철*

(*한국전기연구소 전기자동차 개발팀)

1. 서 론

고속 철도의 추진시스템은 사용되는 견인 전동기와 이의 구동을 위한 전력 변환 장치로 구성되어 있다. 특히 구동 기술은 고속 전철의 핵심 기술로서 고속 전철의 선진국에서도 기술이전을 기피하는 실정이며 이에 대한 관련 자료도 충분하게 공개되어 있지 않는 실정이다.

고속 전철의 견인 방식은 초기의 직류 전동기 구동 방식에서 최근의 전력 전자기술과 마이크로 컴퓨터의 기술의 발달에 힘입어 교류 구동 방식으로 진보하고 있다. 교류 구동 방식은 사용되는 견인 전동기에 따라 유도 전동기 구동 방식과 동기 전동기 구동 방식으로 구별된다. 특히 동기 전동기 구동 방식은 전류형 인버터 방식으로서 사이리스터 전류(轉流)가 쉬우므로 GTO 사이리스터 같은 자기 소호형 소자가 상용화 되기 이전에 실용화되었다. 그러나, 근래에 대용량 자기 소호형 소자가 등장 함으로서 차츰 유도 전동기 구동 방식이 널리 채택되고 있다.

본 고에서는 동기 전동기, 유도 전동기 구동 방식의 특징을 제어 방식의 관점에서 비교 분석하였다. 특히 동기 전동기 구동 방식의 역행, 제동시의 동작 및 유도 전동기 구동 방식의 전동기 구동을 위한 제어 시스템의 구성 및 추력 제어 방식에 대하여 분석하였다.

2. 교류 구동시스템의 특징

전기 철도의 견인용 교류 전동기는 유도 전동기와 동기 전동기로 구별될 수 있다. 특히 교류 전동기를 인버터로 구동하는 경우의 주회로도를 그림 1에 나타내었다.

먼저 동기기를 인버터로 제어하는 방식에 대하여 설명한다. 직류 입력일 경우는 입력 전압을 초과로 제어한다. VVVF인버터는 입력측에 주 평활 리액터를 갖는 전류(電流)형 인버터이다. 인버터는 상하 2단으로 분할되어 종속 접속 12상으로 구성되어 있다. 상하 2단의 인버터는 위상차를 가지고 운전이 되어 기동시의 토오크 맥동을 저감하고 있다. 각 인버터는 기동시의 전류(轉流: commutation)를 위하여 강제 전류회로를 가지고 있지만 기동시에만 동작되므로 장치의 소형화가 가능하다. 동기기가 회전하게되면 자신의 유기전압으로 전류(轉流)가 가능하게 되므로 부하 전류(轉流)로 절환한다. 따라서, 고속의 반도체 소자를 사용하기 좋은 이점이 있다. 초퍼는 전류형 인버터가 요구하는 전압(저속도는 저전압, 고속시는 고전압)을 공급한다. 전류(電流)형 인버터에는 주 평활 리액터가 전원과 전동기간의 삽입되어 있으므로 전류는 리플이 작은 120도 통전형 방형파가 된다. 전압은 회전자의 회전 계자에서 발생한 정현파에 가까운 파형이 된다.

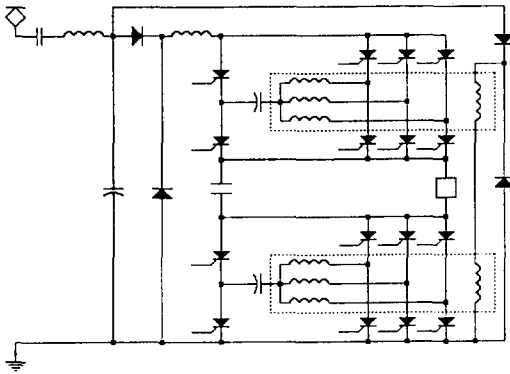


그림 1. 동기전동기의 인버터 구동 및 전압전류파형

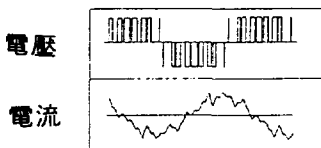
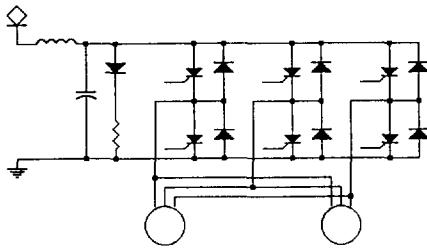


그림 2. 유도 전동기의 인버터 구동 및 전압, 전류 파형

또한, 동기기를 사용하는 방식에는 전동기마다 인버터가 필요하여 복수개의 동기기를 병렬 운전하는 것이 불가능하다. 이 때문에 동력 집중 방식에 주로 쓰이고 있다. 계자는 별개의 초퍼에 의하여 여자(勵磁)된다.

동기기는 본질적으로 고 역률 운전이 가능한 시스템이다. 실용화 되어 있는 부하 전류(轉流) 인버터 방식에는 전류(轉流)에 필요한 전류 여유각을 조정하여 진상 역률로 운전이 가능하므로 원리적으

로는 역률 1로 운전하는 것이 가능하여 효율을 향상시킬 수 있다. 특히, 회전자 내에서 발생하는 손실은 여자선과 제동권선에만 발생되어 유도기와 비교하면 작다.

유도기의 인버터 제어에 대하여 설명한다. 그림 2와 같이 전압형 인버터는 PWM으로 제어되는 경우가 일반적이다. PWM제어 방식은 반도체 소자의 on,off동작을 이용하여 부하에 거의 정현파에 가까운 전압을 인가하기 위한 가장 효과적인 방식이다.

PWM제어에 의한 전압, 전류 파형은 그림 2와 같다. GTO등의 자기 소호능력을 갖는 전력용 반도체 소자의 성능 향상에 따라서 대전력을 고주파로 변조하는 것이 가능하게 되어 전압형 인버터를 PWM제어 하는 방식이 주류가 되고 있다.

또한 유도기 방식의 특징으로는 복수개의 전동기를 1대의 인버터로 병렬운전 하는 것이 가능하다. 전동기는 직렬 접속과 병렬 접속이 가능 하지만, 미끄럼, 역행시의 전력 균형과 차륜경 상이 시의 토크 균형을 고려하여 병렬 접속으로 차륜경차의 정도(程度)를 제한하는 것이 유리하다.

3. 동기 전동기 구동 방식의 특성

3.1 전력 회로의 구성

동기 전동기 구동 방식의 분석을 위하여 SNCF와 JEUMONT - SCHNEIDER (MTE-ALSTHOM)에 의하여 개발된 BB26000 기관차의 동기 전동기 구동 방식에 대하여 설명한다.

전력회로의 구성은 그림 3과 같으며 두개의 동기 전동기가 double star 방식으로 연결되어 있다. 주 변압기 TFP, 주 필터 FL, PL, 전지 BA, 두개의 모터 구동의 오일 펌프 MPH, 모터 콤프레서 MCP, 두개의 강제 공기 캡 히터 MAETH를 제외하고는 전력회로와 보조 회로는 동일한 두개의 회로로 구성 되어 있으며, 각각의 보기에 설치되어 역행시, 제동시 동일하게 동작된다. 각각의 회로는 각각의 스위치 기어, fail safe 보호 시스템, 보조 콘버터 CVS AUX로 구성되어 있다. 그러므로, 각 부분은 독립적이다. 그러나, 한 부분에 고장이 발생하면 다른 부분도 같이 차단되게 되어 있다.

보조 콘버터는 다음에 열거한 보조 기기에 500

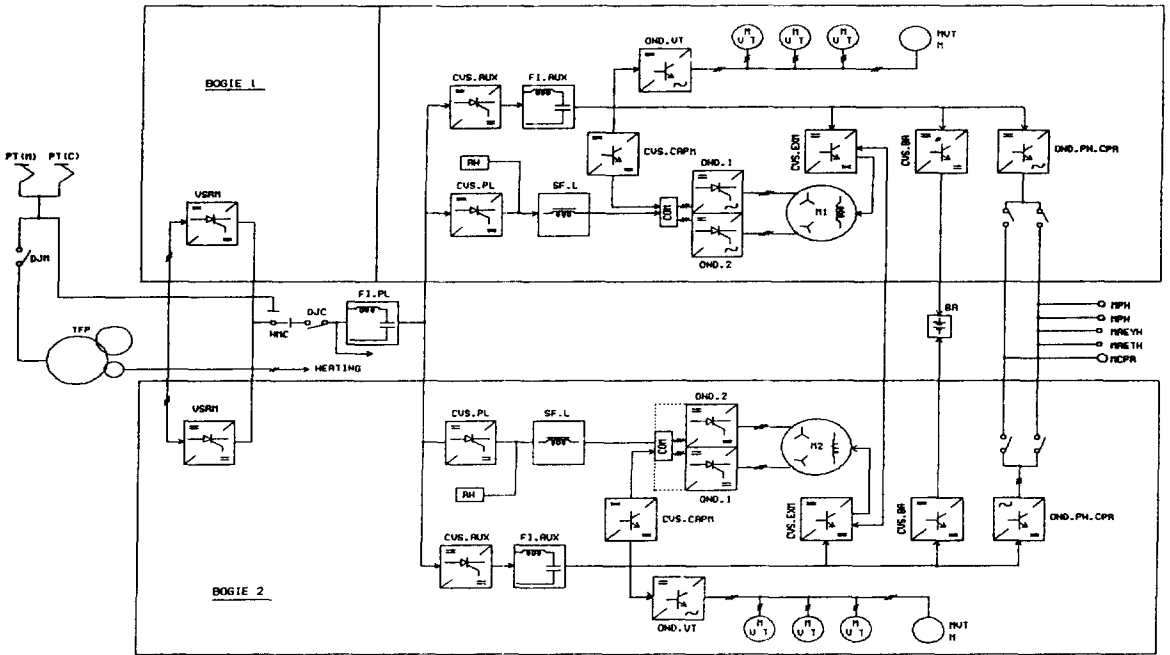


그림 3. 전력 회로 및 보조 회로

V DC를 공급한다.

- 구동 모터의 여자 초퍼 CVS. EXM
- 전류 캐패시터 CVS. CAPM
- 네개의 모터 블로어에 380 V 전원을 공급하는 3상 인버터 OND. VT
- 전지 충전 장치 CVS. BA
- 모터로 구동되는 오일 펌프, 모터 콤프레서, 강제 공기 쉘 히터에 380V를 공급하는 3상 인버터 OND. PH. CPR

부터, 여자 초퍼 CVS. EXM에 의하여 공급된다.

기동시는 캐패시터 CAPM과 두개의 사이리스터

3.2 동작 원리

1) 역행 모드(그림 4)

동기 전동기가 토오크와 역기전력을 발생시키는 원리는 고정자가 고정되어 있고, 여자 권선이 회전하는 것을 제외 하면 직류 전동기와 같다. 고정자 권선은 직류 전동기의 정류자 역할을 하는 사이리스터 세트(인버터 OND1, OND2)에 의해서 전원이 공급된다. double star 동기 전동기와 인버터로 구성된 장치에는 주 필터에서 공급되는 직류 전원을 300 Hz로 초핑하는 주 초퍼 HPL로부터 평활 리액터 SFL를 통하여 전력이 공급된다. 여자 전류는, 강압 초퍼 CVS. AUX에 의하여 공급된 500V로

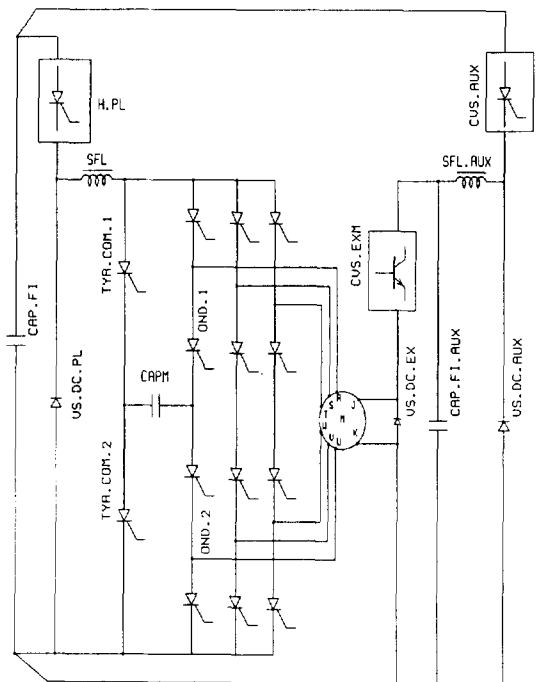


그림 4. 역행 시의 동작 회로

TYR COM1과 TYR COM2으로 구성된 전류(轉流) 보조회로가 고정자 권선의 역 기전력의 크기가 자연 전류(轉流)에 부족할 경우 사이리스터의 전류(轉流)를 보조한다. 이를 보조 전류(轉流) 동작이라 부르며 속도가 20 kph미만이면 작동한다. 자연 전류(轉流)가 가능하면 작동을 멈춘다.

필요 추력에 따라 속도 증가와 추력 제어는 주 초퍼의 도통 시간을 75 kph까지는 점차적으로 증가 시켜서 이루어진다. 초퍼가 최대 전압을 공급하게 되면 그 이후의 속도 증가는 여자 초퍼의 도통 시간을 점진적으로 감소시켜 즉, 약 계자 운전에 의해서 이루어진다.

두개의 초퍼의 운전은 서로 협조되어 동기 전동기가 직류 분권 전동기와 비슷하게 동작되도록 한다. 자연 전류(轉流)나 강제 전류(轉流)에 관계없이 동작원리는 동일하며 각각의 사이리스터 제어는 전기적으로 30도 위상차를 갖게 운전되어진다.

2) 제동 모드(그림 5)

그림 5는 제동 모드때의 회로도이다. 건인 전동기는 동기 발전기로 동작하며 초퍼 CVS, EXM은 여자 전류를 공급한다. 모든 사이리스터를 동시에

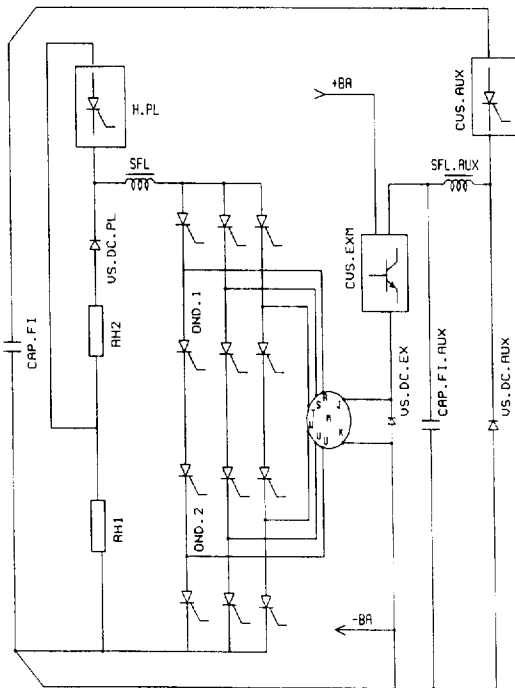


그림 5. 제동시의 동작 회로

도통시키면 두개의 인버터는 다이오드 제어 정류기로 동작한다. 정류된 전류는 리액터 SFL과 두개의 병렬로 연결된 제동저항 RH1, RH2를 통하여 흐르게 된다.

고속 운전시에는 주 초퍼(저항 RH2단자에 연결된)는 동작하지 않는다. 제동 전력은 여자전류를 변화시킴으로서 이루어진다. 제동 전력은 속도 감소시 여자 전류를 최대값에 도달 할때까지 증가시킴으로서 점차적으로 유지된다. 그 후 주 초퍼가 동작하여 저항 RH2를 점진적으로 단락 시킴으로서 제동 전력이 유지된다. 초퍼가 정상 동작하게되면 오직 저항 RH1만이 회로에 남아있게되며 제동 전력은 속도에 따라 감소 된다.

중간 필터에서 여자 초퍼에 전류를 공급한다. 강압 초퍼 CVS, AUX는 중간 초퍼를 통하여 여러 종류의 제동시에도 가선에 전력을 공급한다.

4. 유도 전동기 구동 방식의 특성

4.1 시스템의 구성

건인 제어를 위한 블럭도는 그림 6과 같다. 중앙 컴퓨터에 의해 제어되는 2개의 부 컴퓨터가 두대가 있는데, 직렬 인터페이스를 통하여 차량 제어 레벨과 통신하고 VSI 제어 세트를 동작하게 한다. 중앙 컴퓨터는 라인 제어, DC link 제어, 건인 전동기 제어, 스핀 및 슬라이드 방지, 접촉자 제어 및 모터터링과 같은 기능 들을 책임진다. 사이리스

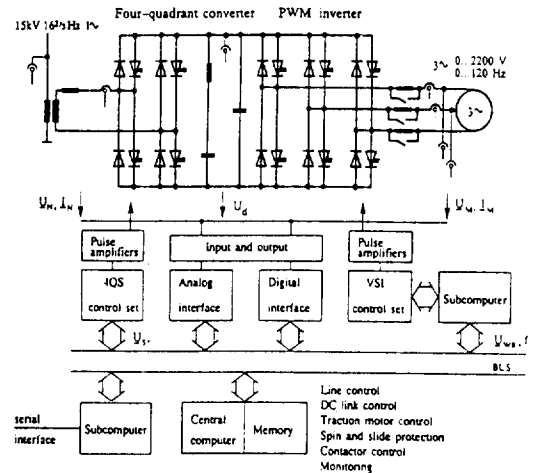


그림 6. VSI를 위한 건인 제어 하드웨어 블럭도

터 콘버터의 동작을 확실히 하기 위하여 부수적인 요소들의 측정, 제어가 요구되고 전류전류 및 전류 실패를 감시하여야 한다.

4.2 견인 유도 전동기의 벡터 제어

견인 유도 전동기에 벡터 제어 방식을 적용 하면 유도 전동기의 특성이 직류 전동기의 정상 상태 특성과 동적 특성과 유사하게 제어 될 수 있다. 벡터 제어의 구현을 위하여 전동기의 변수, 즉 2차측 저항치나 정확한 속도 궤환없이 자속과 토크에 대한 성분을 분리 할 수 있다. 이를 위하여 전동기의 단자 전압, 전류가 자속이나 토크 성분의 전류를 결정하는데 쓰여지며 이는 자속 모델과 벡터 분석기에 의해서 이루어진다. 이들의 출력은 컴퓨터에 의하여 저장되며 차후의 계산 및 감시에 쓰이게 된다. 벡터 제어기의 구성은 그림 7과 같다.

유도 전동기의 전류는 두 성분으로 나뉘는데 자화 성분 전류 I_M 은 자속 축에 일치하고 전동기의 자화에 관계하며 토크 성분 전류 I_W 는 자속 축에 수직이고 토크에 관련된다.

자속 기준제어는 자속 혹은 자화 전류 및 토크 전류를 독립적으로 설정하거나 제어함을 의미한다. 전동기 단자 전압과 상전류는 벡터량으로서 자속을 결정하는데 사용된다. 이는 자속 모델(Flux Model)에 의하여 수행 된다. 자속 모델은 다음 식에 의하여 표시된다.

$$\Psi_z = \int (U_z - R_1)dt - L_{\sigma}i_z$$

$$\Psi_\beta = \int (U_\beta - R_1)dt - L_{\sigma}i_\beta$$

$i_z, i_\beta, U_z, U_\beta$ 는 측정된 전압, 전류 $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}, U_{as}, U_{bs}, U_{cs}$ 에 의해서 다음식으로 구해진다.

$$i_z = i_{as}, i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(i_{cs} - i_{bs})$$

$$U_z = U_{as}, U_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}}(U_{cs} - U_{bs})$$

자속 모델의 입력과 출력변수는 전동기의 공급 주파수 성분을 가진다. Vector analyzer /vector rotator는 자속에 수직이거나 같은 방향인 두 전류 성분과 절대 자속값을 결정한다. Vector Analyzer /vector rotator는 다음 식에 의해서 구현된다. 특히, 자속 성분과 토크 성분 전류는 자속의 위치에 의하여 결정된다.

$$\Psi_z = \sqrt{\Psi_M^2 + \Psi_W^2}$$

$$I_M = \cos\theta_1 i_z - \sin\theta_1 i_\beta$$

$$I_W = \sin\theta_1 i_z + \cos\theta_1 i_\beta$$

$$\text{여기서 } \theta_1 = \int \omega_1 dt$$

자속 모델과 vector analyzer /vector rotator는 하이브리드로 구현 된다. 적분은 아나로그 방식으로 행하여 진다. R_1 과 L_{σ} 에 대한 출력값, Ψ, I_M 및 I_W 는 아나로그 인터페이스 모듈의 도움으로 컴퓨터에 입력되어 측정값으로서 제어 시스템에 이용된다. 기준치 연산과 자속기준제어는 컴퓨터내에서 수행된다. 자속 기준치 Ψ^* 는 속도의 함수이다. 속도가 낮은 영역에서의 자속은 일정하다. 최대 전압에 도달할때 자속은 속도에 역 비례하여 감소하여 약계자 영역에서 운전된다. 자화 전류 기준치 I_M^* 과 자속 제어기 출력의 합은 자화 전류 제어기에 대한 기준치가 된다. 이 기준치는 자화 전류 제어기에 의해서 조절된다. 그러므로 자화전류 기준값 I_M^* 는 분리회로(Decoupling Network)에 대한 제어기의 기준치이다. 토크 전류 성분 기준치 I_W^* 를 자속 기준치 Ψ^* 로 나누면 토크 설정점 M^* 가 된다. 슬립 주파수 명령치 f_s 는 아래의 관계식에서 유도된다.

$$f_s = \frac{I_W^*}{\Psi^*} R_L$$

여기서 R_L 은 회전자 저항.

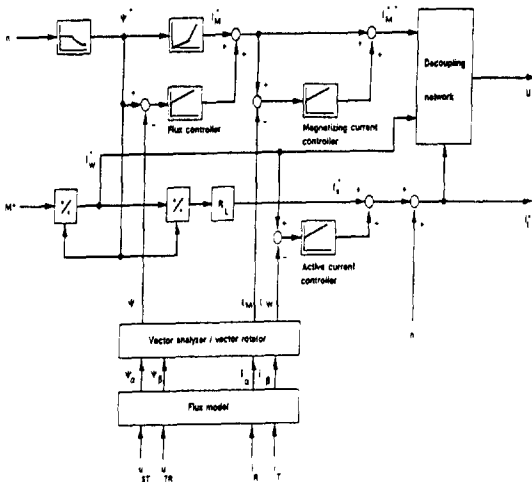


그림 7. 벡터 제어기의 구성

능동 전류제어기는 불안정한 제어의 주원인인 고정자 저항 R_1 의 온도에 따른 대한 보상과 실제전류 I_M 을 전류 명령치 I_M^* 과 일치시키기 위한 슬립 주파수 명령을 제어한다. 슬립 주파수 명령 f_s 과 펄스 엔코더로부터 측정된 전동기 속도 n 의 합은 VSI 주파수 명령치 f_1^* 가 된다. VSI의 전압 명령 U^* 는 주파수, 토오크 전류 성분 기준치 I_w^* 및 조정된 자화 전류 기준치 I_M^* 으로부터 분리회로에서 계산된다.

5. 결 론

교류 구동 시스템의 각종 특성에 대하여 살펴 보았다. 구동 전동기는 동기기 및 유도기 방식이 있지만 관련 기술의 진보에 따라 유도기 구동 방식에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 유도기 구동 방식에서는 제어 측면에서 벡터 제어의 적용, 병렬 운전, 재 점착제어에 대한 구현이 요구된다.

고속 철도의 구동 시스템의 개발을 위하여는 관련 산업계, 학계, 연구 기관의 밀접한 협조가 요구된다. 하드웨어 측면에서는 대용량 전력용 반도체의 구동 및 냉각 기술, Layout과 packaging 기술, 고조파 저감 기술등이 해결하여야 할 기술이며, 소프트웨어 측면에서는 전력 회로 설계 기술, 관련 알고리즘 개발, fail safe 제어기 구현 기술에 대한 연구가 시급하다.

하드웨어 개발에는 선진국과 같은 경험 축적이 많이 되지 않은 실정이므로 많은 시간이 소요될 전망이다. 그러나, 소프트웨어 측면에서는 접근이 용이 함으로 시뮬레이션등을 통하여 하드웨어의 개발에 대비한 연구가 활발히 진행 되어야겠으며 특히 동적 정적 부하시험을 위한 시험설비의 확충 등이 시급히 요구 된다.

- [1] B. K. Bose, "Power Electronics and AC Drives", Prentice-Hall, 1986
- [2] 한국전기연구소, "고속 전철의 성능 향상을 위한 전기 및 전자 기술 연구", 과학기술처 보고서, 1991
- [3] 일본 전기 학회, "전기차의 교류 구동 인버터 제어 방식", 전기학회 기술보 고, 1987
- [4] D. Brun, " SNCF experience with power electronics- experiments of AC drives and their consequences on the choices made for the design of new electric units", Proc. of International Conference on Electric Railway systems for a New Century, 1987
- [5] F. Jonard, "The new locomotives of French railways with synchronous motors", Proc. of International Conference on Electric Railway systems for a New Century, 1987
- [6] G. Gedeon, K. Klausecker and W. Lang, "Mikrocomputer- Antribssteuerung fur ICE-", Electriche Bahnen, 1986



오성철(吳星哲)

1958년 1월 23일생. 1980년 서울대 공대전기공학과 졸업. 1982년 서울대 대학원전기공학과 졸업(석사). 1989년 University of Florida 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전기자동차개발팀 선임연구원.