

영구자석 동기전동기(PMSM)의 설계 및 착자 기술

윤중석*, 김광현**

(* (주)코모텍 연구소장, **전남대 전기공학과 교수)

1. 서 론

동기전동기는 전원주파수에 동기하여 동기속도로 회전하는 전동기를 일컫는다.

동기전동기는 60Hz의 상용 전원을 인가하였을 때 스스로 기동이 되지 않는 문제점을 가지고 있어서 특별한 기동장치를 부가적으로 필요로 하기 때문에 일반 용도로 널리 사용되어지지 못하였다.

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor)는 회전자에 영구자석을 설치하고, 고정자에 다상 권선을 한 전동기로서, 그 권선에 전원을 인가하여 회전자계를 발생시켜 전원에 동기된 회전수로 회전을 하도록 구성되어 있다. 회전자에 영구자석을 사용함으로써 회전자의 손실이 없어져서 고효율화, 소형화가 실현된다.

최근 전력전자 기술의 발달로 제어기술이 진보함에 따라 벡터제어에 의한 제어용 모터의 영역이 확대됨에 따라 영구자석 동기전동기를 이용한 소형 AC 서보모터 등 정밀제어용으로 영구자석 동기전동기가 DC모터를 대체해 나가고 있다. 또한 엘리베이터 구동과 같은 대용량의 제어용 전동기에도 영구자석 동기전동기가 채용되고 있다.

이는 제어기술의 발달에 의한 제어장치의 간소화와 더불어 그 동안 고가이던 영구자석의 가격하락에 힘입어 고효율 대형 동기전동기가 가격 경쟁력을 가지게 된 데에 기인한다. 그리고 동기전동기의 최대 약점이던 자기동 불가는 자극 위치 검출 및 제어성능 향상으로 미세 속도 제어까지 가능하게 됨으로써 해결되었다.

영구자석 동기전동기를 이용한 구동 시스템은 1990년대에 들어서면서 본격적으로 사용되어 졌지만, 공작기계 로봇 등 10kW이하의 중소용량의 고정밀 제어 분야에서 주로 그 응용 예를 볼 수 있었다. 대용량의 경우 영구자석 여자보다 전자기

여자 동기전동기가 가격 면에서 더 유리하였으며, 전자기유도의 경우 별도의 직류전원을 필요로 하므로 유도전동기에 비해 이점이 없었다고 볼 수 있다.

1995년 이후 네오디뮴계(Nd-Fe-B) 희토류 자석이 상용화되면서 고에너지적 영구자석의 저가화가 실현되어 대용량의 영구자석 동기전동기가 경쟁력을 갖추는 계기가 되었다.

이에 따라 영구자석 동기전동기의 설계, 제작을 위한 영구자석 자기회로의 설계기술, 영구자석 착자 기술 등의 설계 제조기술 분야에서도 획기적 발달을 가져 왔다.

2. 동기전동기의 특징

2.1 동기전동기의 구조

영구자석 동기전동기의 특징은 유도전동기와 비교해서 구조면에서는 회전자의 차이 밖에 없다. 유도전동기는 권선형 또는 농형회전자를 가지며, 회전자에 전류가 흐르는 구조인데 반해, 영구자석 동기전동기는 유도전동기의 권선에 해당하는 부분 대신에 그림 1과 같이 영구자석이 설치되어 있다.

2.2 핵심요소 기술

영구자석 여자 동기 전동기 구동의 핵심 요소기술은 역시 영구자석의 설계 및 최적화 기술 및 동기전동기 자극위치 결정 제어기술이다. 이는 다음과 같은 기술로 나타낼 수 있다.

- (1) 영구자석 선정 및 자기회로 최적 설계
- (2) 영구자석 형상 최적화 설계
- (3) 고정자 권선의 고밀도화
- (4) 코깅토크 최소화 설계
- (5) 우수한 방열 구조 설계
- (6) 진동, 소음 억제 기술
- (7) 정밀 회전자 자극 위치 결정 기술

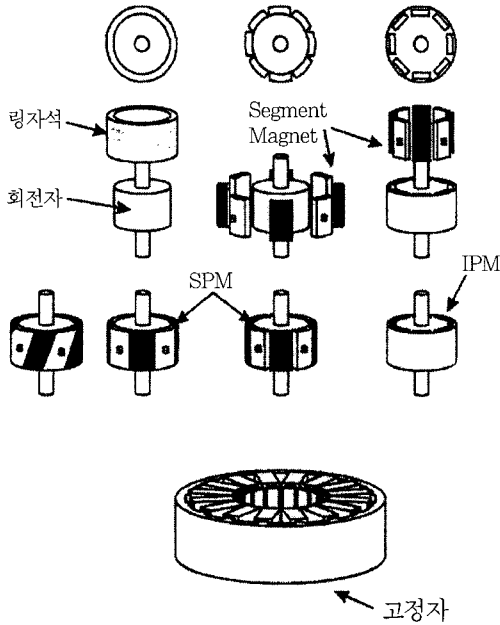


그림 1. 영구자석 회전자 종류

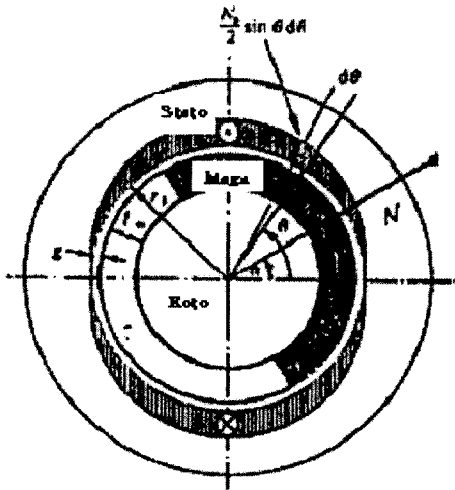


그림 2. 2극 영구자석 동기

3. 영구자석 동기전동기의 원리

영구자석 동기전동기의 특징은 다음과 같다.

- (1) 공극 자속의 정현파 분포
- (2) 정현파 전류파형
- (3) 고정자의 정현적 권선분포(단절권 및 분포권 또는 동심권.)

공극 자속의 준 정현적인 분포는 자극 가장자리의 두께를 차차 가늘게 하고 보다 짧은 자극 원호(120도 정도)를 사용하여 만들 수 있다. 정현파 전류파형은 전류를 조절하여 정현파에 가장 가까운 파형을 출력해 내는 PWM 인버터를 사용하여 구현할 수 있다. 고정자의 단절 및 분포권 또는 동심권은 교류 모터와 동일하다.

토크의 발생은 자속과 고정자의 암페어-도체 분포간의 상호작용이며, 그림 2는 2극 기기에 대한 기본 개념을 제시한다. 고정자 도체는 고정자 내경 주위로 정현적 도체밀도로 분포하며, 공극 자속은 정현적 분포를 하며, 3상 정현파 전류가 흐른다고 가정한다.

회전자 자속 분포는 d 축에 N 극을 위치 시켰으며, 이는 고정자 권선의 축으로부터 양의 각 α 만큼 위치해 있다.

$$B(\theta) = \hat{B} \cos(p\theta - \alpha) \quad (1)$$

토크는 플레밍의 왼손법칙에 의해

$$T = -\frac{\pi r_1 \hat{B} l i N_s}{2} \sin \alpha \quad \text{Nm} \quad (2)$$

양의 토크 최대값은 $\alpha = -\pi/2$ 일 때, 즉 회전자의 N 극 d 축이 고정자의 암페어 도체 분포를 90° 만큼 뒤에서 쫓아올 때 얻어진다.

이는 정지 상태에서의 고정자 권선에 대해 이루어진 것이다. 평형 속도로 회전하는 회전자에 균일한 토크를 공급하기 위해 고정자의 암페어 도체 분포는 회전자와 동기화 되어 회전하여야 한다. 상 당 총 턴 수는 N_s 이고, 상전류가 직렬로 이들 모두를 통과하여 흐른다면, 서로 $2\pi/3$ 의 전기각을 이루는 평형 정현파 전류와 3상 권선과 함께 회전 암페어 도체 분포는 아래와 같다.

$$\begin{aligned} & i \cos \omega t \frac{N_s}{2} \sin p\theta \\ & + i \cos(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \frac{N_s}{2} \sin(p\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ & + i \cos(\omega t + \frac{2\pi}{3}) \frac{N_s}{2} \sin(p\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ & = \frac{3}{2} I \sqrt{2} \frac{N_s}{2} \sin(p\theta - \omega t) \end{aligned} \quad (3)$$

그리고 회전 자속 분포는

$$B(\theta) = \hat{B} \cos(p\theta - \omega t - \alpha) \quad (4)$$

토크는 고정자 권선의 경우와 같은 표현을 사용하여, $p\theta$ 를 $p\theta - \omega t$ 로 대치하면

$$T = \frac{3}{2} I \sqrt{2} \frac{\pi r_1 \hat{B} N_s}{2} \sin \beta \quad (5)$$

여기서 $\beta = -\alpha$ 이다. 각 β 는 토크각이라 불리고, 모터동작에 대해 양의 값을 갖는다.

그리고 권선에 유기되는 순시 상 기전력은

$$e = \frac{\hat{B} l \omega r_1 N_s \pi}{2p} \sin(\omega t + \alpha) \quad (6)$$

따라서 r.m.s. 상 기전력은

$$E_{ph} = \frac{\pi}{2\sqrt{2}} \frac{\hat{B} l \omega r_1 N_s}{p} V_{r.m.s.} \quad (7)$$

4. 영구자석 동기전동기의 설계

4.1 적용분야의 요구사항

전동기 설계시 아래와 같은 요구사항을 검토한다.

- (1) 적용 규격(KS, IEC, JIS, NEMA, DIN)
- (2) 연속 출력 또는 토크 요구사항
- (3) 최대 출력 또는 토크 요구사항
- (4) 최대 속도
- (5) 정역 운전
- (6) Motoring / Braking 운전
- (7) 공급전원 전압
- (8) 공급전원 주파수
- (9) 제어형태: 토크제어, 속도제어, 위치제어
- (10) 폐루프제어에서의 정밀도 및 밴드폭
- (11) Programmability : motion profiles, start/stop ramps 등
- (12) Soft-starting여부 (Inrush 제한)
- (13) 동적 요구사항 : 토크/이너서 비, 가감속 능력
- (14) 기어사용 또는 Direct Drive
- (15) 사용 냉매의 내외부 온도 : 공냉 / 유냉 / 수냉 Flow Rate
- (16) 환경요소 : 분진, 위험 화학물질, 폭발성 가스,
- (17) 절연물, 자석 및 기타 전동기 재료와의 친화성
- (18) 최대 소음 수준
- (19) EMC 및 고조파에 대한 법규 준수여부
- (20) 보증 요구사항

- (21) 보수
- (22) 동작설명서 및 수리설명서
- (23) 진동수준
- (24) 고장 보호: 보호형식(과전류, 과전압, 저전압, 과속, 과열, 권선고장, 진동센서)

4.2 전동기 설계

전동기 설계시 다음과 같은 순서로 설계를 한다.

- (1) 회전자 형식: 내전형, 외전형, 축방향 공극형 중 용도에 맞는 것을 선택한다.
- (2) 자석 재질 선정: Ferrite, SmCo, NdFeB 적용분야의 환경조건, 가격 등을 고려하여 결정한다. 그림 3은 여러 가지 영구자석의 특성곡선이다.

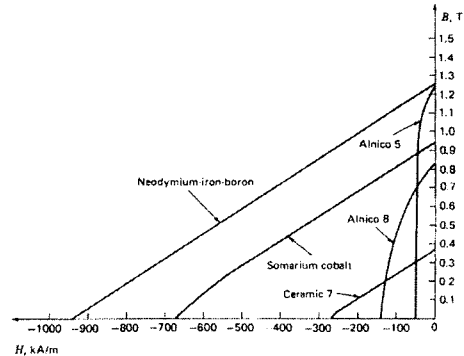


그림 3. 영구자석의 특성 곡선

- (3) 극수 선정: 극수가 많아지면 요크부의 두께가 작아도 되므로 전동기 직경이 감소되며, 극당 고정자 암페어도 체수가 작아도 되므로 단위 인덕턴스와 동기리액턴스가 작아지고, 자기 불평형 가능성이 적어져서 베어링에서의 축자계 및 축전류가 적어진다. 그러나 착자 및 조립의 비용이 많이 든다.
- (4) 상수 및 고정자 슬롯수 선정 : 보통 2상 또는 3상을 많이 사용하며, 상수, 극수 등을 고려하여, 코깅 또는 토크리플 최소가 되는 조합을 결정하며, 코일이 감기는 슬롯간의 간격인 코일피치가 크면 END Turn길이 길어져 인접코일과의 중첩으로 제조가 곤란하며 저항이 커진다. 동손 증가하므로 주의해야 한다.
- (5) 개략 치수 설계 : 전동기의 토크 방정식

$$T = K D_r^2 L_r \quad (8)$$

여기서

K : 출력상수

D_r : 회전자 직경

L_r : 축방향 길이

전기장하(Electric Loading) : 공극주위의 선형 전류밀도
실효치

$$A = \frac{\text{Total Ampere Conductor}}{\text{Airgap Circumference}} = \frac{2mN_{ph}I}{\pi D_r} \quad (9)$$

자기장하(Magnetic Loading) : 극당 자속밀도의 평균치 B
한 극당의 기본파자속은

$$\Phi_1 = B \times \frac{\pi D_r L_r}{2p} \quad (10)$$

그리고 상당 역기전력은

$$E = \frac{1}{\sqrt{2}} \omega k_{w1} N_{ph} \Phi_1 \quad (11)$$

최대 공극 Power는 (회전시의 철손 및 기계손을 무시하면)

$$mEI = T\omega / p \quad (12)$$

따라서 토크식은

$$\begin{aligned} T &= \frac{\pi k_{w1}}{\sqrt{2}} B A V_r \\ &= \frac{\pi^2 k_{w1}}{4\sqrt{2}} B A D_r^2 L_r \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, $V_r = \left(\pi \left(\frac{D_r}{2} \right)^2 L_r \right) \quad (14)$

$$K = \frac{\pi^2 k_{w1}}{4\sqrt{2}} B A = 1.66 B A \quad (15)$$

with $k_{w1} = 0.95$

일반적으로 출력상수 K 는 Ferrite자석 사용 모터의 경우 6~11 kN/m², 희토류자석 사용 모터의 경우 11~32 kN/m² (전폐형) 정도이다.

위와 같이 필요 토크로 D_r 부터과 L_r 을 정한다.

자기장하는 철심에서의 자속밀도는 1.8T 를 넘어가면 철손이 과다하게 되어 비경제적이다. 보통 고정자 치의 경우 1.7T 이하, 요크의 경우 1.2 T이하로 설계를 한다.

전기장하는 전류밀도와 권선 작업성에 제한을 받는다.
전류밀도는

$$J = \frac{A}{\text{SlotFill} \times \text{SlotWidth} / \text{Slotpitch} \times \text{Slotdepth}} \quad (16)$$

여기서, Slot fill : 슬롯단면적에서 코일만의 단면적의 비율 (40~50%)

코일 단면적당의 전류인 전류밀도의 값이 높으면 코일이 소손한다. 따라서 너무 높지 않게 설계해야 한다.

일반적인 전류밀도 값

전폐형 : 1.5~5 A/mm²

공랭식 : 5~10 A/mm²

수냉식 : 10~30 A/mm²

(6) 공극길이 선정 및 자기장하 결정

전기적으로 공극길이는 짧을수록 큰 출력을 낼 수 있다. 그러나 기계적인 제한 즉 조립상의 어려움, 제작공차의 불균일에 의한 회전자와 고정자의 충돌, 자기흡인력 및 반발력에 의한 진동, 토크 불균일 등 제한 때문에 무한히 작게 할 수는 없다.

공극길이가 크면 코깅토크의 저감되는 이점이 있다.

(7) 회전자 설계 및 극당 자속 결정

정해진 자석 재질로 필요한 자기장하를 위한 자석의 형상 및 자석 두께를 선정한다. 자석의 형상은 원하는 자석밀도파형이 나오도록 하면서, 코깅토크가 최소화될 수 있도록 형상화 한다. 감자특성곡선상의 최악조건에서의 굴곡점감자계와 최고피크전류가 흘렀을 때에 감자에 견딜 정도의 두께를 선정한다. 감자전류는 정격전류의 5~10배정도로 한다.

(8) 설계 치수 결정 흐름

- 고정자 적층 치수 설계
- 영구자석의 형상 설계
- 자기회로 해석 철심부분의 자속밀도 검토(치:1.7T 이하, 요크:1.2T 이하)
- 권선 점적률 계산 및 검토 (40~50%)
- 전류밀도 계산 및 검토 3~8 A/mm² 정도
- 적정치 않으면 권선 변경 적정하면 적층치수 확정
- 도체수 및 코일당 턴수 결정
- 권선크기, 상당 저항, 상당 인덕턴스

(9) 특성 계산

온도상승, 전류밀도, 자속밀도, 자석 감자 검토

(10) 목적에 맞을 때까지 반복 계산

(11) 전자기 설계가 끝나면 열 해석, 구조해석 등 기계적인 해석 및 검토를 하여 설계를 완료한다.

5. 착자기술

그림 4는 영구자석의 착자전류에 따른 자기특성을 보인다. 영구자석을 착자하기 위하여 전용 착자요크를 설치한 경우, 영구자석의 초기 상태는 '가' 위치의 $H=0, B=0$ 의 상태이다. 직선으로 표시된 것들은 영구자석 외부의 자기회로에 의해 정해지는 외부자기회로의 퍼미언스계수를 나타내는 부하선이다. 자기저항이 크면 기울기가 작아지고, 자기저항이 작으면 기울기가 크게 된다. 착자전류 흐르면 부하선이 H축의 양의 방향을 따라 이동하게 되고 영구자석 내부의 자기특성은 '가'에서 '나'의 위치로 그림 4의 곡선을 따라 자속밀도가 증가하게 된다. $i=i_{max}$ 의 전류가 흐르게 되면 자속밀도는 B_m 이 되고, i_{max} 이상의 전류가 흐르면 자기특성은 포화되어 공기의 투자율인 μ_0 의 기울기로 서서히 증가한다. 전류가 다시 0으로 감소하면 영구자석의 히스테리시스 특성에 의해 '다'의 잔류자속밀도 B_r 을 거쳐 '라' 위치의 B_m, H_m 으로 표시되는 동작점에 이르게 된다. 영구자석을 완전착자하기 위해서는 H_{max} 이상의 자계를 걸 수 있는 i_{max} 이상의 전류를 흘려야 하고, 영구자석의 진보자력, H_c 의 3배 이상의 자계가 필요하다. 체적 V_m 의 영구자석을 착자하는 데 필요한 에너지는 $\frac{1}{2} B_{max} H_{max} V_m$ 이고, 이는 $\frac{1}{2} CV^2$ 의 용량을

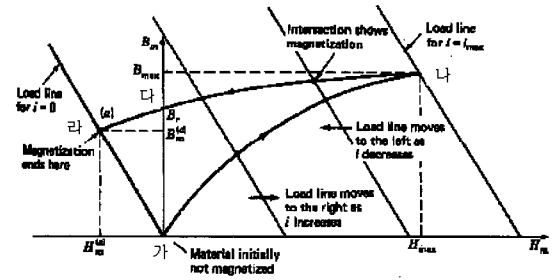


그림 4. 착자전류에 따른 자기특성

가진 착자기가 필요함을 의미한다.

그리고 영구자석 회전자의 경우 영구자석의 착자 및 부착은 2가지의 방법이 있다.

첫째는 영구자석을 먼저 착자하여 회전자에 부착하는 경우이고 둘째는 먼저 부착하고 착자하는 경우이다. 전자를 선착자, 후자를 후착자라 부른다.

선착자의 경우 자석을 날개로 착자하므로 착자 장치가 크지 않아도 되지만 착자된 자석을 부착하는데 설비가 필요하다. 간단한 지그로 가능하지만 조립시간이 길어진다. 후착자의 경우는 조립시간은 짧아지지만, 회전자 전체를 착자해야 하므로 고가의 착자설비가 필요하다.

	1985	1990	1995	2000
구동방식	DC	영구자석형 BLDC		
영구자석	Ferrite		SmCo	NdFeB
권선방식	파권	분포권		돌극 집중권
철심구조	일체형(슬롯)			분할 조립형
Encoder	레졸버/타코	광학식		자기식
신호방식	Analog 전압파형	Pulse(15선식) ~1000ppr		(9선식) 통신형 16000ppr
적용용량	~1kW	~5kW		~22kW
주요특징	AC화 [安川] M,F Series		소형, 고속화 [安川] R Series, [三菱] J Series, [安川] Σ Series, [PANASONIC] MINAS	
			소용량화 [PANASONIC] MINAS	
			대용량화 [安川] M Series, [三菱] H Series	

그림 5. 동기전동기의 설계 기술 및 제어의 발전 동향

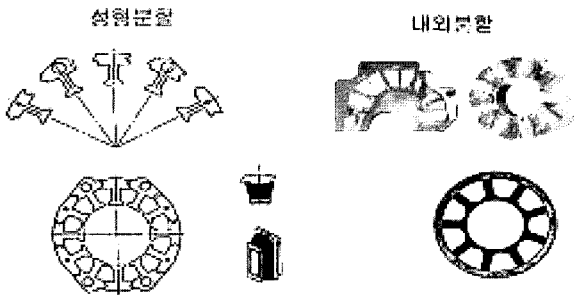


그림 6. 소형화를 위한 제조기술의 혁신

참고 문헌

- [1] J.R.Hendershot Jr, TJE Miller “Design of Brushless Permanent-Magnet Motors”, Magna Physics & Oxford, 1994년.
- [2] “영구자석 동기전동기를 적용한 고속 엘리베이터용 신형 권상기”, 엘리베이터 주차설비, 1997년.
- [3] 박민호, “유도기기”, 동명사, 1984년.
- [4] 武田 “PM모터의 제어법과 회전자 구조에 의한 특성 비교”, 電學論D, 114권 6호 1996년.
- [5] 윤중석, “BLDC Motor 설계 및 산업계 응용”, 2002 전력전자 학술대회 튜토리얼 교재, 2002년

MotorPro™ - 시스템의 구성

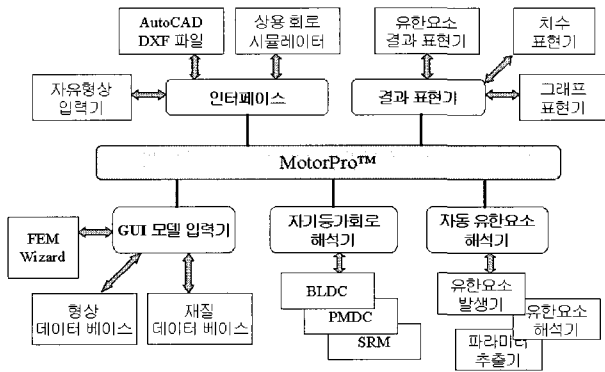


그림 7. 설계의 집중화·자동화의 일례

6. 맺음말

최근의 영구자석 동기전동기는 그림 5와 같이 다양화, 대용량화, 소형화 추세이며, 이 추세는 앞으로도 지속될 것으로 보인다. 그림 6은 소형화를 위한 제조기술의 혁신을 보인 것으로 고정자 철심을 분할하여 권선하는 방식이다. 이 결과 기존의 일체형 코어 방식보다 모터 크기를 1/2~1/3 정도까지 소형화가 가능해 졌다.

전동기 설계 분야에서도 기본적 설계흐름은 다르지만, 과거 집중회로 해석에서 분포적 설계방법으로 발전하고 있으며, 최근 제어기 설계 Tool인 MatLab Simulink, Pspice 등과의 파라미터의 공유가 가능한 Program 개발 등 그림 7과 같이 설계의 집중화, 자동화가 급속히 이루어지고 있다.

착자 기술에서도 고자력의 자석 착자, 부분착자, 대형기의 분할 착자 등의 기술 등 기술 개발이 활발하다.

향후 제어기와 전동기의 파라미터가 상호 참조되어 최적의 전동기 제어시스템이 이루어지는 시스템 설계에 대한 연구가 이루어져야 할 것이다.

〈 저 자 소 개 〉



윤중석(尹重錫)

1986년 서울대 전기공학과 졸업, 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1993년 동 대학원 졸업(공학박사). 1993년~1995년 금성산전 주안연구소 선임연구원. 1995년~1999년 LG산전연구소 책임연구원. 1999년~2000년 LG·OTIS 엘리

베이터 책임연구원. 2000년~현재 (주)코모텍 연구소장.



김광헌(金光憲)

1960년 12월 27일생. 1983년 전남대 계측제어 공학과 졸업. 1986년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전남대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 편집위원.