제한된 환경에서의 해수냉각펌프용 유도전동기 최대출력 운전을 위한 약계자 제어

손영득¹, 서용주², 정준형¹, 김장목[†]

Advanced Field Weakening Control for Maximum Output Power Operation of Seawater Cooling Pump Induction Motor in a Limited Environment

Yung-Deug Son¹, Yong-Joo Seo², Jun-Hyung Jung¹, and Jang-Mok Kim[†]

Abstract - The induction motor is used for driving the special equipments such as warship and submarine pump due to robust structure and simple maintenance. Domestic and foreign warships use a wide range of voltages and the DC voltage sources mainly from battery. In the low voltage level, the Δ -connection operation of induction motor can be used for the maximum power. However, the temperature of the inverter increases because of the high input current. On the other hand, Y-connection operation of the induction motor does not cause a problem of temperature because of the low input current compared to the Δ -connection. But the lack of the supply voltage can not be avoided. Therefore, this paper suggests the algorithm of the optimum field weakening control to extend the operating range of the induction motor with maximum power in a limited thermal and DC voltage condition.

Keywords: induction motor, field weakening control, seawater cooling pump, DSP

명명법

V_{dc_th}	임계 전압
V_{ll_rate}	정격 선간전압
$i_{ds_rate}^e$	정격 d 축 전류
V_{s_rate}	정격 전압
ω_{e_rate}	정격 각속도
I_{s_rate}	정격 상전류
$i_{qs_lim}^e$	q 축 전류제한 값
i_{s_lim}	상전류 제한 값

1. 서 론

선박 및 해양 플랜트의 엔진 및 발전기 등 다양한 장

비에 사용되는 해수냉각펌프에는 주로 구동이 쉽고 유지·보수가 용이한 유도전동기가 사용된다. 또한 공작기계, 스핀들 드라이브와 같은 정격속도 이상의 가변속 구동분야와 자동차 및 선박 등의 전원 변동이 심한 전압원을 사용하는 분야에서도 사용되고 있다.

유도전동기의 약계자 제어는 정격속도 이상의 영역에서 운전하는 경우와 DC-Link 전압이 부족한 경우에 적용된다^[1]. 오늘날까지 약계자 제어는 다양한 방법에 대해서 연구가 진행 되어왔다. 전압 및 전류 제한을 고려하지 않고 단순히 회전자 속도에 반비례하는 자속성분을 감소시키면 약계자 제어가 가능하지만 최대 토크를 발생 할 수 없다^[2]. 또한 Look-up Table을 이용해 자속 성분을 생성하여 약계자 제어를 하면 메모리 사용이 많고 범용이 아닌 특정 전동기에 한정된다는 단점을 가진다^[3]. 최근 널리 이용되는 방법으로는 전압 및 전류 제한원을 이용하여 수식 기반의 최적 자속 성분을 구하는 것으로 일정 전압 조건하에서 넓은 고속 운전 영역을 가질 수 있다^{[4]-[6]}.

군용 선박이나 잠수함 등에 사용되는 냉각 펌프용 시동기(Inverter System)의 경우 제한된 부피 및 중량 조건, EMC/EMI 환경시험, 충격 및 진동 시험, 가변 DC 입력 전압 등의 다양한 조건들을 만족해야 하기 때문에

Paper number: TKPE-2013-18-6-5

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: jmok@pusan.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Pusan National University

Tel: +82-51-510-2366 Fax: +82-51-513-0212

¹ Dept. of Electrical Eng., Pusan National University

² Offshore comm'g & Trial Team, Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd

Manuscript received May 29, 2013; accepted Sep. 16, 2013

Table 1 limited operation condition of inverter system for seawater cooling pump

Operation Limit Condition	
Variable input voltage	450 ~ 830[V]
Thermal	Disable the cooling fans
Weight	Within 18kg
Volume	459 x 312 x 247 mm
Shock and vibration	MIL-STD-901D
Ambient temperature	-28.9℃ ~ 37.8℃
Load	5.5[kW] pump load
Maximum temperature	70℃

제작이 까다롭다. 본 논문에서 사용되는 군용 선박의 해수 냉각 펌프용 시동기 구동 제한 조건은 표 1과 같다.

해수 냉각 펌프용 시동기는 충격 및 진동 시험을 만족하기 위해 내구성이 취약한 속도 센서의 사용이 힘들고 유도전동기의 고성능 운전을 위해서 센서리스 벡터 제어 방식을 적용해야만 한다. 또한 450~830[V]의 가변 DC 입력 전압 조건에서 Y결선을 하는 경우, DC전압이 부족하기 때문에 펌프의 최대 출력을 낼 수 없고, 이는 2차 사고로 이어질 위험이 있다. 유도전동기의 Δ결선을 하는 경우, 최대 출력 운전이 가능하지만 높은 입력 전류 때문에 제한적인 시동기 조건에서는 방열 조건을 만족한 구동이 어렵기 때문에 Y결선에 대한 체계적인 연구가 필요하다. 따라서 본 논문에서는 방열 조건과 가변 DC 입력 전압 조건을 만족시키는 시동기의 최대 출력 운전을 위해 개선된 약계자 제어 알고리즘을 제안하였으며 실험을 통해 알고리즘의 효용성을 검증하였다.

2. 유도전동기 시동기 제한 조건 분석

2.1 입력단 결선 방식에 따른 특성

유도전동기는 입력단 결선 방식에 따라 입력 전압과 입력 전류의 특성이 달라진다. Y결선 운전의 경우 높은 입력 전압과 낮은 입력 전류의 특성을 가지며 Δ결선 운전의 경우는 이와 반대의 특성을 가진다^[7]. 논문에 사용된 유도전동기의 사양은 표2와 같다.

Δ결선 운전을 할 경우 Y결선 운전에 비하여 전류가 $\sqrt{3}$ 배 높다. 이는 식 (1)에 의해서 인버터 도통 손실이 3배 더 크다는 것을 알 수 있다.

$$P_{loss} = I^2 R \quad (1)$$

제한된 시동기의 방열 조건 아래에서 Δ결선 운전을 하여 포화 온도를 측정 하였다. 실험 조건은 표 3과 같으며, 온도측정 지점은 그림 1에 보여지고 있으며, 온도 변화 곡선은 그림2와 같은 결과를 얻었다.

Table 2 Specification of 3-phase induction motor for seawater cooling pump

Specification	Y-connection	Δ-connection
Power	5.5[kW]	
Rated speed	1160[rpm]	
Input voltage	380[V]	220[V]
The minimum required DC voltage	540[V]	310[V]
Input current	18.38[A]	$18.38\sqrt{3}$ [A]
Conduction loss ratio	1	3
Voltage condition	Dissatisfaction	Satisfaction

Table 3 Experimental conditions at Δ-connection

Experiment conditions	
DC-Link Voltage	450[V]
Connection	Δ-connection
Rpm reference	1160[rpm]
Rpm	1160[rpm]
Phase current limit	32.26 [A]
Load	5.5[kW] pump load
Switching frequency	5[kHz]
Ambient temperature	20℃

실험 결과 DC전압 450V를 이용한 Δ결선 운전의 경우 최대 출력 운전은 가능하다. 하지만 IGBT 온도가 100[℃]가 넘는 지점 까지 포화되지 않고 계속 증가하였다. 최대 동작온도 150[℃]와 허용 가능한 대기 온도 70[℃]를 고려했을 때, 장시간 구동이 힘들다는 것을 알

Fig. 1 Point for sensing temperature

Fig. 2 Experimental temperatures at Δ-connection

Table 4 Experiment conditions at Y-connection

Experiment conditions	
DC-Link Voltage	450[V]
Connection	Y-connection
Rpm reference	1160[rpm]
Rpm	1080[rpm]
Phase current limit	18.6[A]
d-axis current	10.6[A]
Load	5.5[kW] pump

수 있다. 그러므로 유도전동기의 입력단 결선은 전류가 적게 흐르는 Y결선을 고려하여 권선 손실에 의하여 발생하는 열의 결과를 검토하여야 한다.

2.2 Y결선 운전 시 가변 DC전압에 따른 운전 영역

해수냉각펌프용 시동기의 입력전압 조건은 450~830[V]의 가변 DC 전압이다. 따라서 Y결선 운전을 하면, 낮은 DC 전압일 때 최대 출력 운전을 위한 입력 전압을 만들어 낼 수가 없다. 이는 PWM 방식에 따른 전압 이용률과 관계가 있다. 대상 유도전동기의 정격 선간 전압은 380[V]이며, 이 전압을 출력하기 위한 최소의 DC 단 전압의 크기는 SVPWM 방식을 적용할 경우 540[V]이다^{[8]-[10]}. 따라서 유도전동기에 가변 DC 입력 전압이 450 ~ 830[V]로 입력 될 경우에, 유도전동기의 운전 영역을 전압 부족 영역과 전압 충분 영역으로 나눌 수 있다. 전압이 부족한 영역에서 Y결선 운전에 대한 실험 조건은 표 4와 같고, 실험파형은 그림3과 같다.

실험 결과와 같이 DC단 전압이 부족할 때 Y결선 운전을 하면 전압 부족으로 최대 출력 운전을 할 수 없는 것을 확인 할 수 있다. 속도지령은 1160[rpm]이지만 실제속도는 1080[rpm]이며, 이 때의 출력은 부하전동기의 전류로부터 4.49[kW]임을 알 수 있다. 이는 실제 유도전동기의 정격인 5.5[kW]에서 약 1[kW] 정도 부족한 출력이다.

3. 제한된 환경에서의 제안된 약계자 제어

3.1 DC단 전압 감소에 따른 운전점 분석

DC단 가변 입력 전압 조건의 해수 냉각 펌프용 시동

Fig. 3 Experimental waveforms at Y-connection

기에서 DC단 전압의 감소에 따라 최대 상전압이 낮아져 그림4와 같이 속도-토크 곡선이 이동한다.

이에 따라 그림5와 같이 540[Vdc]에서 450[Vdc]로 DC 전압 감소하기 때문에 운전점이 A에서 B로 이동하게 된다^[11]. 이 때 약계자 제어를 적용 할 경우 운전점이 C 지점으로 이동하지만 실제 최대출력운전은 할 수 없다. 그러므로 최대출력운전을 위해 상전류를 증가시켜 운전점을 D에서 동작하게 되면 최대출력 운전이 가능하다.

3.2 제안한 약계자 제어 알고리즘

해수냉각펌프용 시동기는 가변 DC단 전압 조건에서도 출력은 항상 일정해야 한다. 그러므로 기존의 약계자 제어와 같이 d축 전류를 감소시키고, 상전류를 증가시켜 q축 전류를 증가시킨다. 이에 따라 최소의 상전류로 최대출력을 낼 수 있는 약계자 제어가 가능하다. 본 논문에서 제안하는 약계자 제어는 d축 전류와 상전류 제한값으로 전압 제한원을 식(2)와 같이 나타낸다^{[5][12]}.

$$(\omega_e \sigma L_s i_{s_limit}^*)^2 + (1 - \sigma^2) (\omega_e L_s i_{ds}^{e*})^2 \leq V_{s_max}^2 \quad (2)$$

Fig. 4 Speed-torque curve of induction motor considering the DC-link voltage drop

Fig. 5 Torque curve considering the increase of phase current limit value

정격출력곡선 또는 d축 전류와 상전류 제한 값으로 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.^[6]

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{L_r} \frac{L_m^2}{L_r} i_{ds}^{e*} \sqrt{i_{s_limit}^* - i_{ds}^{e*}} \quad (3)$$

식 (2)와 (3)을 그림으로 나타내면 그림6과 같다.

DC단 전압이 540[Vdc]인 경우 전압 제한원과 정격출력곡선이 만나는 점 A가 정격 운전점이다. DC단 전압이 450[Vdc]로 감소하여 전압제한원이 감소하면, 그림5와 같이 정격출력곡선과 전압제한원이 만나는 점이 D점으로 바뀌게 된다. 운전점 D에서는 A점의 운전보다 d축 전류가 감소하고 상전류 제한이 증가한다. 이는 최소의 상전류로 동일한 정격출력을 낼 수 있는 지점이다.

DC단 전압의 가변에 따른 Y결선 구동이 가능한 영역과 전압이 부족한 영역으로 나눌 수 있다. 약계자 제어 없이 유도전동기의 정격출력이 가능한 최소의 DC단 전압은 유도전동기의 선간 정격전압에 의해 구할 수 있으며 식 (4)와 같다. 여기서 η 는 여유계수로 일반적으로 0.95정도의 값을 사용한다.

$$V_{dc_th} = V_{ll_rate} \times \sqrt{3} \div \eta \quad (4)$$

이 값을 DC단 전압과 비교하여 약계자 제어를 적용하는 영역과 적용하지 않는 영역으로 구분 할 수 있다. $V_{dc} \geq V_{dc_th}$ 인 영역에서는 약계자 제어를 적용하지 않으며, 항상 정격 d축 전류와 정격 상전류 제한 값으로 운전한다. 정격 d축 전류는 유도전동기의 정격 전압, 전류, 속도로부터 구해지는 전압 제한원과 전류제한원의 교점으로부터 식 (5)와 같이 구할 수 있고 속도제어기에 적용되는 q축 전류 제한 값은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.^[5]

Fig. 6 Operation points on voltage limit circles and load curves with proposed field weakening algorithm

$$i_{ds}^{e*} = i_{ds_rate}^e = \sqrt{\frac{\left(\frac{V_{s_rate}}{\omega_{e_rate}}\right)^2 - (\sigma L_s I_{s_rate})^2}{L_s^2 - (\sigma L_s)^2}} \quad (5)$$

$$i_{qs_lim}^e = \sqrt{i_{s_rate}^2 - i_{ds_rate}^2} \quad (6)$$

$V_{dc} \leq V_{dc_th}$ 인 영역에서는 DC단 전압이 감소하여 전압제한원이 작아지게 되어 최대 출력 운전점이 그림 5과 같이 A에서 D로 이동해야 하며 약계자 영역에서의 d축 전류는 전압 제한원과 정격 출력 곡선의 교점으로 구할 수 있다. 식 (2)와 식 (3)으로부터 식(7)과 같이 d축 전류를 구할 수 있고 식 (7)과 정격 출력 곡선으로부터 q축 전류와 상전류 제한 값을 식 (8), (9)와 같이 구할 수 있다. 이때의 d축 전류와 q축 전류는 상전류가 최소가 되는 정격 출력점이다.

$$i_{ds}^{e*} = \sqrt{\frac{-B + \sqrt{B^2 - 4AC}}{2A}} \quad (7)$$

$$A = L_s^2 \quad B = -\frac{V_{s_max}^2}{\omega_e^2} \quad C = \sigma^2 L_s^2 \frac{T_e^2}{K_e^2}$$

$$i_{qs_lim}^e = \frac{T_e}{K_e i_{ds}^{e*}} \quad (8)$$

$$i_{s_lim} = \sqrt{i_{ds}^{e*2} + i_{qs_lim}^{e*2}} \quad (9)$$

3.3 전압 보상기

약계자 영역에서 전류제어기로부터 출력되는 전압지령은 때때로 인버터가 이용 가능한 전압을 초과한다. 이로 인해 전압의 부족으로 원하는 전류 출력을 낼 수 없게 되고 이는 전압 부족 영역에서의 전류 맥동으로 발생하게 된다. 이를 보상하기 위해 그림 7과 같이 전압 보상기를 사용하였고 전류 제어기에서 출력되는 전압 지령이 인버터 최대 허용 전압을 넘지 않도록 제한을 해주며, 기존 전압 지령 벡터와 가장 근접한 전압 벡터가 만들어지도록 보상하였다.^[12]

Fig. 7 Flow chart of the voltage command compensator

Table 5 Experimental conditions at rated operation

Experiment conditions	
DC-Link Voltage	540[V]
Connection	Y-connection
Rpm reference	1160[rpm]
Rpm	1160[rpm]
Phase current limit	18.6[A]
d-axis current	10.6[A]
Load	5.5[kW] pump

4. 실험

전체 블록도의 구성은 그림 8과 같으며 알고리즘을 구현을 위해 DSP는 TI사의 TMS320C28346을 사용하였다. 그림 9은 본 논문에서 제안한 방식을 실험하기 위한 전체 시스템을 나타낸다.

실험 결과를 비교하기 위해 DC단 전압이 540[V]일 때 Y결선으로 구동하였다. 실험 조건은 표5와 같으며 5.5[kW]의 펌프 부하를 인가하였다. 이때의 과도상태 파형은 그림 10와 같으며 온도 변화는 그림 11과 같다. 실험 결과 정상적인 출력이 발생하는 것을 확인할 수 있지만 정상 상태에서는 전압 지령이 인버터 최대 허용전압을 초과하여 전류에 리플이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

DC단 전압이 부족할 경우 출력이 발생하지 않는 문제를 해결하기 위해서 Δ 결선을 하면, 온도가 포화되지 않고 계속 증가하는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점들을 해결하기 위해서 개선된 약계자 제어 알고리즘을 적용하여 실험하였으며 실험 조건은 표 6과 같다.

Fig. 9 Experimental setups

Fig. 10 Experimental waveforms in condition of 540[V] and Y-connection

Table 6 Experimental conditions of the proposed field weakening algorithm

Experiment conditions	
DC-Link Voltage	450[V]
Connection	Y-connection
Rpm reference	1160[rpm]
Rpm	1160[rpm]
Phase current limit	20.49[A]
d-axis current	8.9[A]
Load	5.5[kW] pump

Y결선 및 DC단 전압 450[V] 조건에서 약계자 제어 알고리즘을 적용하여 구동하면 d축 전류를 작게 제어하고 최대 상전류 제한이 20.49[A]까지 증가하여 1160[rpm], 5.5[kW] 구동이 가능하다. 또한 표 3의 Δ 결선시의 상전류 32.26[A]보다 작은 전류로 손실이 감소한다. 또한 그림 12과 같이 방열판 온도는 최대 60[°C]에서 포화되었으며, 시동기 내부 대기온도는 39 [°C]에서 포화된다.

본 논문에서 제안하는 새로운 약계자 제어 알고리즘 성능을 확인하기 위해 DC단 전압을 600[V]~450[V]로 선형적으로 가변시켰으며 실험 조건은 표 7과 같고 알고리즘 적용 전, 후를 비교하였다.

그림 13은 Y결선 및 약계자 제어를 하였을 경우 속도, 부하 및 q축 전류를 표시하여 전 영역에서 운전 가능성을 보여주고 있다.

Fig. 11 Experimental temperatures in condition of 540[V] and Y-connection

Fig. 12 Experimental temperatures in 450[V] and Y-connection under field weakening conditions

Fig. 8 Block diagram of the proposed field weakening control algorithm for induction motor

Table 7 Experimental conditions of DC-Link voltage variation

Experiment conditions	
DC-Link Voltage	600 ~ 450[V]
Connection	Y-connection
Rpm reference	1160[rpm]
Switching frequency	5[kHz]
Load	5.5[kW] pump

DC단 전압을 가변시키면 그림 14(a)와 같이 V_{dc_th} 보다 작아지는 영역에서 전압이 부족하기 때문에 최대 출력을 낼 수 없게 되고 이로 인해 속도 및 부하가 감소한다. 이러한 변화는 그림 5에서 운전점이 A에서 B로 점차적으로 이동하는 것과 같다.

본 논문에서 제안하는 알고리즘을 적용하여 DC단 전압을 감소시켜 그림 14(b)와 같이 유도전동기의 동작 성능을 확인하였다. DC단 전압 감소에 따라 인버터에서 출력되는 최대 상전압의 크기가 감소하므로 최대 상전류 제한을 증가시켜 최대 출력 운전이 가능하도록 제어

(a) Without the proposed algorithm

(b) With the proposed algorithm

Fig. 14 Experimental results

Fig. 13 Experimental waveforms in 450[V] and Y-connection under field weakening conditions

하였다. 따라서 배터리 전원을 상용하는 특수한 환경에서 전압이 감소하여도 일정한 출력을 유지하여 정상적인 펌프 성능의 운전을 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 해수 냉각 펌프용 3상 유도전동기를

구동시키는 시동기의 다양한 환경 조건 및 제한 조건을 분석하여 이에 적합한 최적의 약계자 제어 알고리즘을 제안하였다. 제안된 방식은 기존의 d축 전류만 감소시켜서 운전하는 것이 아니라, d축 전류를 감소시키면서 상전류 제한 값 또한 증가시켜서 항상 최대 출력 곡선을 따라 운전하도록 제어한다. d축 전류는 전압 제한원과 최대 출력 곡선의 교점으로 결정하며, 상전류 제한 값은 최대 출력 곡선으로부터 구할 수 있다. 본 알고리즘을 해수 냉각 펌프용 시동기에 적용하여 구동할 경우 최소의 상전류로 발열을 최소화 하면서 최대 출력 운전을 할 수 있다. 제안한 약계자 제어 알고리즘은 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

이 논문은 2012년도 정부재원(지역혁신 인력 양성 사업) 한국 연구재단의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.(No. 2012026153)

References

- [1] Myoung-Ho, Dong-seok Hyun, Soon-Bong Cho, "Selection of Optimal Stator Flux Reference of Stator Flux-Oriented Induction Machine Drive," *KIEE*, Vol. 49B, No 7, pp. 494-499, 2000.
- [2] Xingyi Xu, D.W. Novotny, "Selecting the Flux Reference for induction Machines in the Field Weakening Region," *Industry Applications Society Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 361-367, 1991.
- [3] G. Gallegos-Lopez, F. S. Gunawan and J. E. Walters, "Current control of induction machines in the field-weakened region," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 43, No 4, pp. 981-989, 2007.
- [4] A. Bünte, H. Grotstollen, P. Krafka, "Field weakening of induction motors in a very wide region with regard to parameter uncertainties," *Proceedings of the IEEE Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 1, pp. 944-950, 1996.
- [5] Sang-Hoon Kim, Seung-Ki Sul, "Maximum torque control of and an induction machine in the field weakening region," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 31, No. 4, pp. 787-794, 1995.
- [6] H. Abu-Rub and J. Holtz, "Rotor oriented nonlinear control system of induction motors operating at field weakening," *Proceedings of the IEEE IECON*, pp. 1085-1090, 2007.
- [7] Werner Leonhard, "Control of Electrical Drives," Springer-Verlag, 2001.
- [8] H.C.j.de jong, "AC Motor Design," Hemisphere Publishing, 1989.
- [9] D. Zinger, F. Profumo, T.A. Lipo, D.W. Novotny, "A direct field oriented controller for induction motor drives using tapped stator windings," *Power Electronics Specialists Conference*, Vol. 2, pp. 855 - 861, 1988.
- [10] H. W. van der Broeck, H. C. Skudelny, G. V. Stanke, "Analysis and realization of a pulsewidth modulator based on voltage space vectors," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 24, pp. 142 - 150, 1988.
- [11] D.W. Novotny and etc, "Vector Control and Dynamics of AC Drives," Oxford, 1996.
- [12] T. Ohtani, N. Takada, K. Tanaka, "Vector control of induction motor without shaft encoder," *Industry Applications Society Annual Meeting*, Vol. 1, pp. 500-507, 1989.
- [13] S.Morimoto, M. Sanada and Y. Taketa, "Wide-Speed peration of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator," *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 30, No. 4, pp. 920-926, 1994.

손영득(孫榮得)

1971년 12월 31일생. 1997년 한국해양대 제어계측공학과 졸업. 1998년 동경공업대학교 교환연구생. 2001년 Kobe University of Mercantile Ocean Electro-Mechanical 졸업(석사). 2001년~2009년 현대중공업 선임연구원. 2010년~현재 부산대 전자전기공학부 박사과정. 기술사.

서용주(徐用周)

1983년 3월 3일생. 2010년 공주대 공대 전자전기제어공학부 졸업. 2013년 부산대 대학원 로봇관련협동과정 졸업(석사). 2013년~현재 대우조선해양 해양시운전팀.

정준형(鄭準衡)

1986년 8월 13일생. 2012년 부산대 공대 전자전기통신공학부 졸업. 2012년~현재 동대학원 석사과정.

김장목(金長睦)

1961년 8월 6일생. 1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2007년 Florida State University 방문교수. 2001년 3월~현재 부산대 전기공학과 교수. LG전자 스마트제어 센터장.