

논문 98-02-03

스위치드 리럭턴스 전동기의 센서리스 속도제어

Speed Sensorless Control of Switched Reluctance Motor

申奎宰*, 權營顏*

(Kyoo-Jae Shin* and Young-Ahn Kwon*)

요약

스위치드 리럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 회전자관성이 작으며 고효율을 가지는 전동기이다. 그러나 회전자 위치각에 적절한 상여자 신호를 동기화하기 위해서는 위치센서가 필수적이다. 이 위치센서로 인하여 구동시스템의 가격상승과 열악한 환경에서 시스템의 신뢰성이 저하되는 문제점을 가지게 된다. 본 논문에서는 위치 및 속도센서가 없는 스위치드 리럭턴스 전동기의 속도제어 시스템을 연구하였다. 센서리스 SRM의 안정된 속도제어를 위하여 회전자 위치검출을 상전류 및 변화율 검출로부터 구하였으며 속도오차에 대하여 도통각 주기폭을 변동하는 속도제어 시스템을 제안하였다. 이 구동시스템은 위치결정회로, 속도제어기, 디지털논리 정류자, 스위칭각 제어기와 인버터로 구성된다. 제안된 시스템은 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

Abstract

Switched reluctance motor(SRM) has the advantages of simple structure, low rotor inertia, and high efficiency. However, position sensor is essential in SRM in order to synchronize the phase excitation to the rotor position. The position sensors increase the cost of drive system and tend to reduce system reliability. This paper investigates the speed control of sensorless SRM in which the phase current and change rate are utilized in position decision, and the period of dwell angle is variable for speed control. The proposed system consists of position decision circuit, speed controller, digital logic commutator, switching angle controller and inverter. The performances in the proposed system are verified through the experiment.

Keyword : switched reluctance motor, speed sensorless control, variable dwell angle

I. 서론

스위치드 리럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 회전자에 권선이나 영구자석이 없으며

로 제작비용이 저렴하고 회전자 관성이 작으며 넓은 범위의 속도에서 고효율운전이 가능할 뿐만 아니라 구동회로가 간단한 점 등의 장점을 가지는 전동기이다[1]-[3]. SRM의 속도제어를 위해서는 회전자의 위치각에 대한 정보가 필수적이므로 위치각 정보를 검출하기 위한 센서로서 엔코더와 레졸버가 일반적으로 사용되고 있다. 그러나 이러한 위치센서로 인하여 SRM의 가격상승, 열악한 주위환경에서 센서의 신뢰성 문제와 센서부착을 위한 전동기의 가공문제 등이

*釜山大學校 電氣工學科

(Dept of Elec. Eng., Pusan National Univ.)

※ 본 논문은 1997년 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

接受日: 1998年7月20日, 修正完了日: 1998年11月20日

발생하게 된다. 따라서 경제성 및 신뢰성 향상을 위하여 센서리스 제어에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. SRM의 센서리스 속도제어 방식으로는 개루프 제어방식[4], 상전류 파형 측정에 의한 순시 기전력 측정방식[5]과 인덕턴스 변화량 검출방식[6], 상태관측기를 적용한 자속추정 방식[7],[8], 주파수변조 및 위상변조를 적용한 방식[9], 상호유도 기전력 측정방식[10] 등이 있다.

상기방식에서 개루프 제어방식 및 상전류 검출에 의한 위치각 추정방식은 간단하고 경제적이거나 고투오르크를 발생하기 위하여 도통각을 크게할 경우 역투오르크가 발생하여 효율이 감소하게 되며 도통각을 좁게할 경우 효율은 개선되지만 제어의 안정성이 저하된다. 상전류 측정에 의한 순시 기전력 검출방식은 저속에서는 제어가 어렵고 인덕턴스 변화량 검출방식은 전류초핑 구간에서 발생하는 고조파를 포함한 상전류의 변화율로 인하여 회전자 위치각 정보의 신뢰성이 저하되는 문제가 발생된다. 또한 상태관측기 방식은 실시간 제어를 위해서는 고가의 프로세서가 필요하며 주파수변조 및 위상변조를 적용한 방식은 비어자 상태의 상에 자기진단용 펄스를 주입하기 때문에 역투오르크가 발생하여 구동장치의 성능이 저하되고 회로구성이 복잡하다. 상호유도 기전력 측정방식은 저속에서 속도제어가 어렵고 가변 속도제어를 위해서 고정자 저항, 상호인덕턴스, 자기인덕턴스의 정보들을 필요로 한다.

본 논문에서는 센서리스 SRM의 안정된 속도제어 시스템을 설계하기 위하여 회전자 위치검출을 상전류 및 변화를 검출로부터 구하는 알고리즘을 제시하고 속도오차에 대하여 도통각 주기폭을 변동하는 속도제어 시스템을 제안하였다.

II. SRM 동작

본 연구에서 사용하는 4상 8/6극 SRM의 구조와 스위칭회로는 그림 1과 같고 a상의 스위칭 구성을 나타낸다. 선형구간에서 자속은 식(1)과 같으며 회전자 위치에 대한 일반적인 4상 SRM의 이상적인 인덕턴스 곡선은 그림 2와 같다.

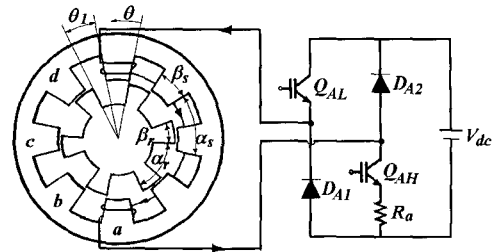


그림 1. 4상 SRM의 단면 및 스위칭 회로
Fig. 1. Cross-section of a four-phase SRM and switching circuit.

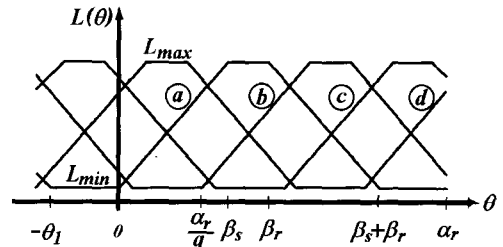


그림 2. SRM의 이상적인 인덕턴스 곡선
Fig. 2. Idealized inductance profile of SRM.

$$\lambda = L(\theta)i \quad (1)$$

회전자의 위치에 대한 a상의 인덕턴스를 4구간에서 식(2)와 같이 결정할 수 있다.

$$L(\theta) = \begin{cases} L_{\min} & -\theta_1 \leq \theta \leq 0 \\ L_{\min} + K\theta & 0 \leq \theta \leq \beta_s \\ L_{\max} & \beta_s \leq \theta \leq \beta_r \\ L_{\min} - K(\theta - \beta_r - \beta_s) & \beta_r \leq \theta \leq \beta_s + \beta_r \end{cases} \quad (2)$$

단, L_{\min} : 최소 상인덕턴스

L_{\max} : 최대 상인덕턴스.

$$K = \frac{L_{\max} - L_{\min}}{\beta_s}$$

SRM에서 전기-기계 에너지 변환은 그림 2와 같이 회전자의 위치각 변화에 대한 시변 인덕턴스에 의

해서 결정된다. SRM의 동작은 각 상의 전압과 발생 토오크 방정식에 의해서 나타낼 수 있으며 자기포화 특성을 무시하면 상전압은 식(3)과 같고 인덕턴스는 회전자 위치각의 함수가 된다.

$$\begin{aligned} v &= Ri + \frac{d\lambda}{dt} \\ &= Ri + L(\theta) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \end{aligned} \quad (3)$$

단, $\omega = \frac{d\theta}{dt}$

그리고 순시전력은 식(4)와 같다.

$$p = Ri^2 + Li \frac{di}{dt} + i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (4)$$

여기에서 회전자의 각속도가 일정하다고 가정하면 식(4)는 식(5)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} p &= Ri^2 + \frac{1}{2} L(\theta) \frac{di^2}{dt} + \omega i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{dt} \\ &\quad - \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \\ &= Ri^2 + \frac{d}{dt} \left[\frac{1}{2} L(\theta) i^2 \right] + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta)}{d\theta} \omega \end{aligned} \quad (5)$$

식(5)에서 순시전력은 저항손실, 저장에너지의 미분치 및 발생출력의 합으로 나타나고 이로부터 발생 토오크는 식(6)과 같다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (6)$$

식(6)을 식(2)에 대입하면 한 상에 대한 순시토크는 식(7)과 같다.

$$T = \begin{cases} 0 & -\theta_1 \leq \theta \leq 0 \\ \frac{1}{2} K i^2 & 0 \leq \theta \leq \beta_s \\ 0 & \beta_s \leq \theta \leq \beta_r \\ -\frac{1}{2} K i^2 & \beta_r \leq \theta \leq \beta_r + \beta_s \end{cases} \quad (7)$$

식(7)에서 비정렬구간 ($-\theta_1 \leq \theta \leq 0$)과 정렬구간 ($\beta_s \leq \theta \leq \beta_r$)에서는 토오크가 발생하지 않으며 인덕턴스가 증가하는 구간 즉 $\frac{dL}{d\theta} > 0$ 에서는 정토크가 발생되고 인덕턴스가 감소하는 구간 $\frac{dL}{d\theta} < 0$ 에서는 역토크가 발생하게 된다. 그리고 평균 토오크 T_{av} 는 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{av} = \frac{q}{\alpha_r} \int_{-\theta_1}^{\alpha_r - \theta_1} T d\theta \quad (8)$$

단, q : SRM의 상수

SRM의 동작은 식(7)과 같이 상인덕턴스가 증가하는 구간에서 상권선을 통전하여 정토크를 발생하고 상인덕턴스가 감소하는 구간에서 상권선을 소호시킴으로써 일정방향의 토오크를 얻게 되며 동일방향의 연속적인 상여자신호에 의해서 전기에너지는 기계에너지로 변환하게 된다. 따라서 SRM은 회전자 위치각에 적절한 상여자 신호를 동기화하기 위한 위치정보를 필요로 한다.

III. 제안된 센서리스 제어방식

3.1 회전자 위치검출

SRM의 속도제어를 위해서는 회전자의 위치각에 대한 정보가 필수적이다. 본 연구에서는 센서리스 SRM의 속도제어를 위하여 상전류 및 변화율 검출로부터 회전자 위치정보를 구하였다. SRM의 상전류와 상전류 변화율은 상권선의 인덕턴스 변화로부터 도출할 수 있으며 결국 회전자의 위치함수로 나타난다. 식(3)의 자속-전압방정식으로부터 식(9)와 같이 나타내면 전류변화율은 식(10)과 같이 된다.

$$v = Ri + \frac{\partial \lambda}{\partial i} \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \frac{d\theta}{dt} \quad (9)$$

$$= Ri + l \frac{di}{dt} + \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \omega$$

단, l 은 상인덕턴스

$$\frac{di}{dt} = \frac{v - Ri - \frac{\partial \lambda}{\partial \theta} \omega}{l} \quad (10)$$

식(10)은 상여자 초기에 저항에 대한 전압강하와 역기전력이 무시된다면 di/dt 와 l 의 관계식으로 나타낼 수 있다. 따라서 상전류 변화율 검출에 의해서 상인덕턴스 크기에 대한 정보를 구할 수 있다. 즉 권선에 흐르는 전류의 증가율은 회전자자의 진입각에 따라 그 기울기가 달라지기 때문에 회전자 위치각에 적절히 여자되는지를 알 수 있는 정보가 된다. 그리고 상전류 변화율 측정시 상전류의 고조파와 노이즈로 인하여 오신호를 검출하게 되면 회전자자의 잘못된 위치정보를 얻게 된다. 따라서 상전류 변화율 측정시 발생하는 고조파 및 노이즈를 제거할 수 있는 기능을 내장하여야 한다. 그리고 한편으로 검출된 상전류는 기준 전류값 i_{ref} 와 비교되어 스위칭각을 결정하는데 사용된다. 이상에서 그림 3과 같은 회전자 위치결정 및 스위칭각 제어 알고리즘을 제안한다. 그리고 제안된 알고리즘은 4상의 각각에 대하여 전류 및 전류 변화율에 의하여 회전자 위치정보를 제공하고 스위칭에 의한 상전류 고조파와 노이즈를 동시에 제거하는 기능을 수행한다.

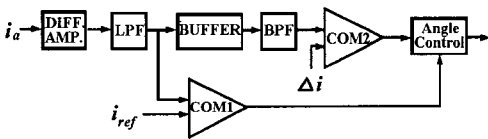


그림 3. 회전자 위치결정 및 스위칭각 제어
Fig. 3. Rotor position decision and switching angle control.

3.2 도통각 신호

도통각을 결정하기 위하여 먼저 SRM이 일회전하는 데 필요한 분해각을 설정하고 가변 운전조건에서

역토크를 억제할 수 있도록 도통각이 결정되어야 한다. 본 연구에서 사용하는 4상, 8/6극 SRM 회전자 가 일회전하는 데 24스텝의 여자신호가 필요하며 이 신호의 한 스텝에 대한 각도는 15°가 된다. 그리고 도통각 신호에서 고평토크를 발생하기 위하여 도통각을 크게할 경우 역토크가 발생하여 효율이 감소하게 되며 또한 도통각을 좁게할 경우 효율은 개선되지만 제어의 범위가 저하된다. 본 연구에서 사용한 SRM의 인덕턴스 곡선은 포화를 무시하는 경우에 그림 4와 같다. 도통각 신호를 위하여 그림 4와 같이 A, B 및 C의 3구간으로 분류하여 4상에 대해 연속적인 신호를 발생하게 한다. 초기기동 시에는 그림 4에서 각 상신호의 A와 B구간, 즉 도통각 범위가 22.5°가 되도록 하고 다음 상과 중복각을 7.5° 이내가 되도록 한다. 이때 중복각인 B구간에서 다음상의 상전류로부터 그림 3의 비교기(COM1) 출력신호에 의해 소호각이 결정된다. 회전자의 위치에 따라 중복각은 B구간 7.5°이내에서 가변된다. 그러나 오동작으로 C구간에서 도통각이 결정될 경우에는 역토크가 발생하므로 상전류의 변화율을 측정하여 회전자와 고정자의 정렬각에서 비교기(COM2)출력신호에 의해 소호각을 결정함으로써 역토크를 억제한다. 정상상태 운전에서는 도통각이 그림 4의 A구간 15°가 되도록 한다. 따라서 비선형 요소인 자속포화에 대한 고려가 필요없이 안정된 초기기동 및 속도제어가 가능하다. 전동기속도는 도통각 신호의 주기폭을 카운팅하여 측정하며 지령속도와의 오차는 속도제어기에 의해 주기폭을 가변함으로써 보상한다.

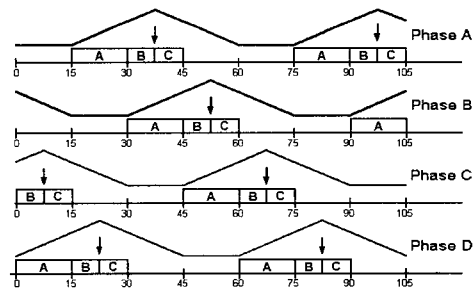


그림 4. 도통각 신호
Fig. 4. Dwell angle signal.

IV. 실험결과 및 검토

제안된 센서리스 SRM 구동시스템의 성능을 검증하기 위하여 그림 5와 같은 전체시스템을 구성하였다. 이 구동시스템은 위치결정회로, 속도제어기, 디지털논리 정류자, 스위칭각 제어기와 인버터로 구성된다. 실험에 사용된 전동기는 정격출력 0.25마력, 정격속도 3000rpm인 4상 SRM이다. 인버터는 그림 6과 같이 비대칭 브리지형 인버터를 사용하였으며 그림 4에서 A와 C상, B와 D상의 상전류가 중복되지 않으므로 그림 6과 같이 6개의 스위칭소자를 사용하는 인버터를 구성하였다. 각 상의 상전류 검출은 검출저항을 이용하여 수행하였다. 또한 과전류에 의해 전동기의 손상을 방지하기 위하여 전류쇼핑 회로를 내장하였다. 그림 5에서 속도제어기에 의하여 결정된 도통각 신호는 디지털 논리 정류자에서 그림 4와 같은 4상 도통각 신호를 발생하고 회전자 위치검출에 의해 스위칭각을 제어하게 되는데 상전류,

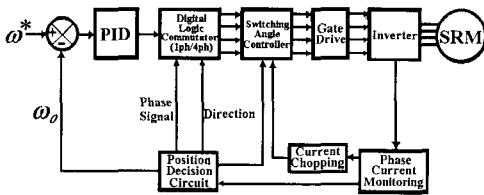


그림 5. 전체시스템 블록도

Fig. 5. Block diagram of overall system.

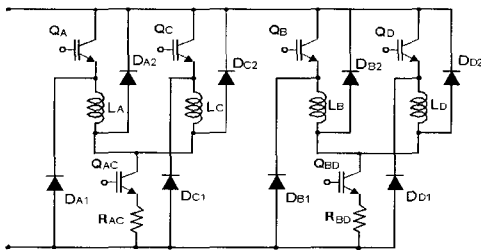


그림 6. 인버터 회로

Fig. 6. Inverter circuit.

상전류변화를, 비교기 COM1과 비교기 COM2의 출력은 그림 7과 같다. 그림 8은 속도지령치를 각각 300rpm, 1500rpm, 3000rpm으로 한 경우의 속도응답을 나타낸다. 저속에서는 상대적으로 측정오차 및 노이즈에 의한 영향이 크게 반영되므로 고속과 비교하여 속도의 제어정도가 감소한다. 그림 9는 각각 300rpm, 1500rpm, 3000rpm의 정상운전시 상전압과 상전류를 나타낸다. 그림 10은 속도지령치 1500rpm의 정·역회전 운전시 속도응답을 나타낸다. 제안된 센서리스 속도제어 시스템은 실험결과에서 나타난 바와 같이 양호한 응답특성을 나타내고 있다.

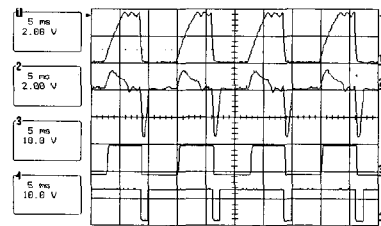
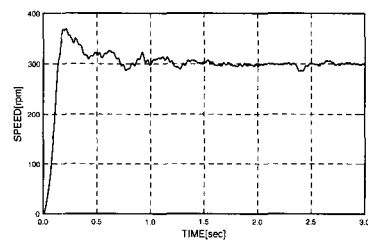
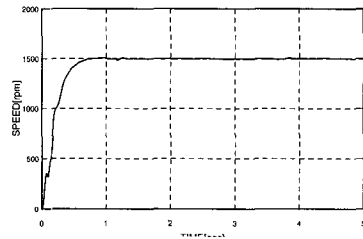


그림 7. 상전류, 상전류 변화율 및 비교기 신호

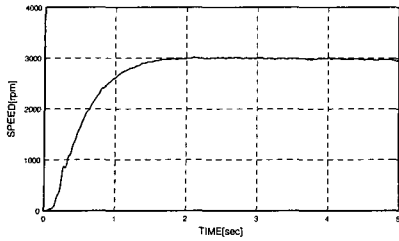
Fig. 7. Phase current(1), the change rate of current(2) and comparator signals(COM1:3, COM2:4) (400rpm, 2.66A/div).



(a) 300rpm



(b) 1500rpm



(c) 3000rpm

그림 8. 속도응답

Fig. 8. Speed responses at various speeds.

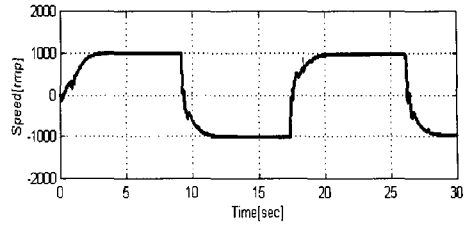
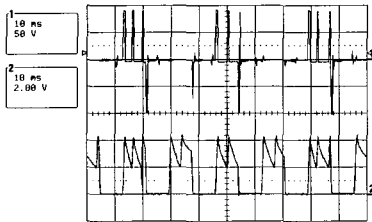
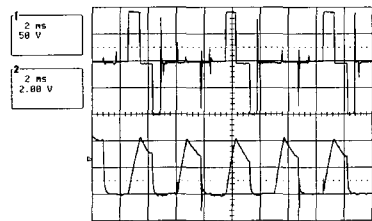


그림 10. 양방향 속도응답

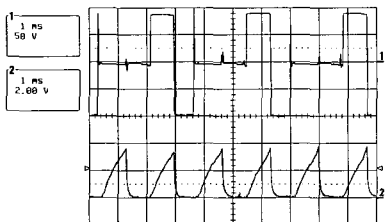
Fig. 10. Speed response in the bidirectional operation (± 1500 rpm).



(a) 300rpm에서 상전압 및 상전류



(b) 1500rpm에서 상전압 및 상전류



(c) 3000rpm에서 상전압 및 상전류

그림 9. 상전압 및 상전류 파형

Fig. 9. Phase voltage and current waveforms at various speeds (50V/div, 2.66A/div).

V. 결론

SRM의 속도제어를 위하여 사용되는 위치 및 속도 센서는 구동시스템의 가격상승 및 열악한 환경에서 신뢰성이 저하되는 문제점을 가지게 된다. 본 논문에서는 센서리스 SRM의 안정된 속도제어를 위하여 상전류와 상전류 변화율에 의한 위치각 검출 알고리즘을 제시하고 속도오차에 대하여 도통각 주기폭을 변동하는 새로운 속도제어 시스템을 제안하였다. 제안된 센서리스 알고리즘은 회로구성이 간단하여 경제성이 뛰어나며 비선형 요소인 자속포화에 대한 고려가 필요없이 속도제어를 수행하는 장점을 가진다. 그리고 제안된 SRM 센서리스 속도제어 시스템은 실험을 통하여 안정된 성능과 추종성이 우수함을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] Y.A.Kwon and K.Reichert, "Choppingless operation of a nonlinear switched reluctance motor", Int Conf on Evolution and Modern Aspects of Synchronous Machines, pp.451-454, 1991.
- [2] Y.A.Kwon "Computation of optimal excitation of a switched reluctance motor using variable voltage", IEEE, Trans. Ind. Elect., vol.45, no.1, pp.177-180, 1998.
- [3] T.J.E.Miller, *Switched Reluctance Motors and Their Control*, Oxford Univ. Press, 1993.

[4] J.T.Bass, M.Ehasani and T.J.E.Miller, "Robust torque control of switched reluctance motor without a shaft-position sensor", IEEE, Trans., Trans. Ind. Elect., vol.33, no.3, pp212-216, 1986.

[5] Bin-Yen Ma, Tian-Hua Liu, Ching-Guo Chen, Tsen-Jui Shen and Wu-Shiung Feng, "Design and implementation of a sensorless switched reluctance drive system", IEEE, Proc. PEDS, pp.174-180, 1997.

[6] P.P.Acarney, R.J.Hill and C.W.Hooper, "Detection of rotor position in stepping and switched motors by monitoring of current waveforms", IEEE, Trans. Ind. Elect., vol.32, no.3, pp.215-222, 1985.

[7] A.Lumsdaine and J.H.Lang, "State observers for variable reluctance motors", IEEE, Trans, Trans. Ind. Elect., vol.37, no2, pp. 133-142, 1990.

[8] C.Elmas and H.Zelaya-De La Parra, "Application of a full-order extended Luenberger observer for a position sensorless operation of a switched reluctance motor drive", IEE, Proc. Control Theory Appl., vol. 143, no.5, pp.401-408, 1996.

[9] M.Ehsani, S.Mahajan, K.R.Ramani and I.Husain, "New modulation encoding technique for indirect rotor position sensing in switched reluctance motors," IEEE, IAS Annual Meeting, pp.430-438, 1992.

[10] I.Husain and M.Ehsani, "Rotor position sensing in switched reluctance motor drives by measuring mutually induced voltages", IEEE, Trans. Ind. Appl. vol.30, no.3, pp.665-672, 1994.

저 자 소 개



申 奎 宰 (學生會員)
 1985년 2월 원광대학교 전자공학과 졸업. 1988년 2월 전북대학교 대학원 전기공학과 졸업.(공학석사) 현재 부산대학교 대학원 전기공학과 박사과정. 현재 순천제일대학 제어계측과 전임강사.



權 營 顏 (正會員)
 1978년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업. 1986년 2월 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업.(공학박사) 1991년 스위스 쾰리히공대(ETH) 방문교수. 현재 부산대학교 전기공학과 교수.