

스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동원리 및 특징

김민회*, 백원식**

(*영남이공대학 전기자동차과 교수, **영남대 전기공학과 박사과정)

1. 서론

최근 간단하고 기계적으로 견고한 구조를 지니고 있는 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)에 대한 관심이 고조되고 있으며, 실용화를 위한 특성개선 및 제어기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 전력반도체 분야의 기술이 발전함에 따라 새롭게 개발된 SRM은 간단한 구조로 인해 제작이 용이하고 고속운전이 가능하며, 스위칭 소자의 제어를 통해 4상환의 운전이 가능하다는 등의 많은 장점을 가지고 있으며, 본 고에서는 이러한 SRM의 구동원리 및 특징에 관해 기술하였다. 극수 및 극호각 등의 변수에 따른 구조적인 특징과 회전력 발생원리, 그리고 속도/토크 특성 곡선에서 구분되는 운전영역에 대한 구동특성에 관해 나타내었다.

2. SRM의 구조 및 특징

2.1 SRM의 구조

SRM은 고정자와 회전자가 모두 돌극형으로 이루어져 있으며, 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨있다. 가변 릴럭턴스형 전동기의 측면에서 SRM은 스텝모터와 유사하지만, 회전자 위치정보의 검출을 통한 폐루프 제어방식이나 고속에서도 효율적인 회전력 발생이 가능하다는 점에서 SRM은 스텝모터와 구분된다⁽¹⁾.

SRM은 기본적으로 고정자와 회전자의 극수 조합에 따라 상수 및 가능한 극호각의 크기가 결정되며, 일반적으로 회전력이 발생하지 않는 구간을 피하기 위해 고정자와 회전자의 극수는 서로 다르게 설계되며, 그림 1은 3상 6/4극(고정자/회전자) SRM의 고정자 및 회전을 보여주고 있다.

회전속도와 회전자 극수로부터 SRM의 기본 스위칭 주파수(fundamental switching frequency)는 다음과 같이 결정된다.

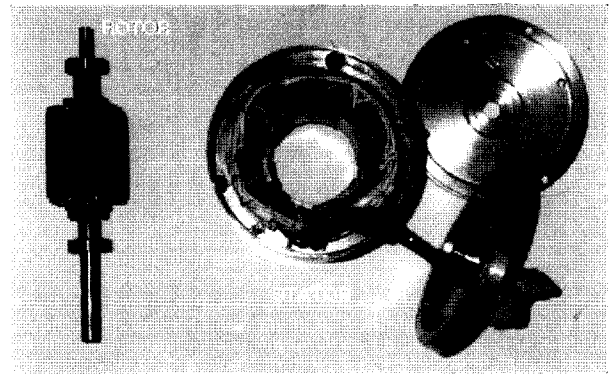


그림 1. 3상 6/4극 SRM의 고정자 및 회전자

$$f_{sw1} = \frac{\omega_{rpm}}{60} \cdot N_r \quad [Hz] \quad (1)$$

여기서 ω_{rpm} 은 전동기의 회전속도이고, N_r 은 회전자 극수이다. 상수가 q 인 SRM의 기본 스위칭 각의 크기에 해당되는 스트로크각(stroke angle)은 식 (2)로 표시된다.

$$\epsilon^0 = \frac{2\pi}{qN_r} \quad [rad] \quad (2)$$

표 1은 다양한 SRM의 고정자/회전자 극수의 조합(N_s / N_r)을 나타내고 있으며, 여기서 m 은 상수, N_{wkp} 는 동시에 여자되는 고정자 극대수(pole-pair)의 수, ϵ^0 는 스트로크 각, S 는 1회전당 스트로크 수를 나타내고 있다.

자속밀도가 높은 운전조건으로 SRM이 적용될 경우에는 N_{wkp} 의 수를 증가시킴으로써 효율적인 운전이 수행될 수 있으며, 하나의 고정자 극대수를 가지는 전동기는 서보전동기와 같이 순간적인 가속이 요구되는 용도에 적합하다⁽⁴⁾.

표 1. SRM의 다양한 고정자/회전자 극의 조합

m	N_s	N_r	N_{wkp}	ϵ^0	S
2	4	2	1	90	4
2	8	4	2	45	8
3	6	2	1	60	6
3	6	4	1	30	12
3	6	8	1	1	24
3	12	8	2	15	24
4	8	6	1	15	24
5	10	4	1	20	18

프린징 현상을 무시할 경우 회전력은 인덕턴스가 증가하는 시점에서만 발생한다고 가정할 수 있으며, 회전력이 발생하는 각의 크기인 토크각(β)은 고정자와 회전자의 극호각 중 작은 극호각에 해당된다. 전동기가 회전하는 동안 연속적인 토크를 생성하기 위해서는 토크각이 스트로크각 보다 작아야 한다($\beta < \epsilon^0$). 또한 킬러턴스 토크의 크기를 좌우하는 인덕턴스비를 증가시키기 위해서는 회전자 극간의 거리가 고정자 극호의 크기보다 커야 하며 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{2\pi}{N_r} - \beta_r > \beta_s \tag{3}$$

여기서 β_s 는 고정자 극호각, β_r 은 회전자 극호각을 나타낸다. 이러한 두가지의 조건으로부터 고정자/회전자 극수의 조합에 따라 가능한 고정자 및 회전자 극호각의 크기가 결정된다. 일반적으로 고정자 및 회전자 극호각의 크기는 가능한 작게 함으로써 고정자 권선수를 증가시키거나, 프린징 현상을 저감시켜 인덕턴스 최소값을 낮춤으로써 인덕턴스비를 증가시킬 수 있다. 그러나 이러한 극호각의 저감으로 인해 토크 공백(dip)이 발생하여 토크 리플이 증가할 수 있다. 따라서 극호각의 크기는 전동기가 적용되는 용도에 따라 인덕턴스비와 토크 리플, 회전자 관성과 포화로 인한 영향 등을 고려하여 적절히 설계되어야 한다⁽¹⁾⁽⁵⁾.

2.2 SRM의 구조적인 특성

SRM은 고정자가 집중권으로 이루어져 있기 때문에 일반 교류기에 비해 상간의 간섭이 적으며, 회전자는 단순히 적층된 철심으로 이루어져 있으므로 구조적으로 단순하고 제작이 용이하다. 또한 발열이 고정자에서만 나타나므로 냉각이 쉽고, 구조적으로 견고하므로 고속구동이 가능하다는 많은 장점을 지니고 있다⁽²⁾.

SRM은 돌극형태의 회전자 위치에 따라 적정 시점에서 고정자 권선을 여자시킴으로써 회전력을 발생하게 되는데, 회전자 위치는 그림 2에 나타난 것과 같이 비정렬위치와 정렬위

치로 구분된다. 비정렬위치는 회전자 극과 극사이의 중심축이 여자되는 고정자 극의 중심축과 일치선을 이루는 위치를 나타내고, 정렬위치는 여자되는 고정자 극의 중심축이 회전자 극의 중심축과 일치선을 이루는 위치를 의미한다.

토크는 회전자가 비정렬위치에서 정렬위치로 이동하는 동안 고정자에 인가되는 전류의 크기에 따라 연속적인 펄스형태로 생성되기 때문에 토크 리플과 소음이 발생할 수 있다는 단점이 있다. 저속운전의 경우에는 빠른 전류의 증가나 감소가 가능하기 때문에 제어를 통해 토크 공백을 줄임으로써 토크리플이 10% 이내로 저감될 수 있으나, 고속운전의 경우에는 제어를 통한 토크리플의 저감에 어려움이 있다. 그러나 고정자 및 회전자의 형상이나 요크두께의 증가 등을 통해 소음 저감에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으며, 이러한 특성 개선을 통해 여러분야에서의 SRM의 적용이 기대되고 있다⁽¹⁾⁽⁴⁾⁽⁵⁾⁽⁷⁾⁽⁹⁾.

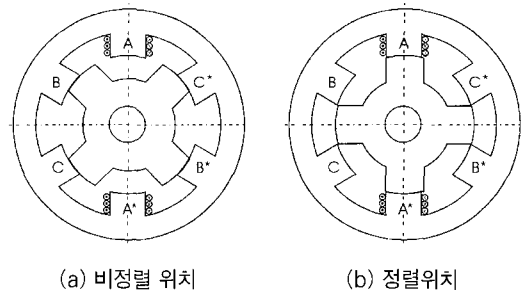


그림 2. SRM의 회전자 위치

2.3 SRM의 구동원리

SRM은 기본 스위칭 주파수에 해당하는 주기로 고정자 권선을 순차적으로 여자시킴으로써 회전력을 발생하며, 고품성 제어나 고속 구동시에는 높은 스위칭 주파수가 요구되므로 구동용 컨버터 및 제어장치가 반드시 요구된다⁽³⁾⁽⁷⁾⁽⁸⁾.

그림 3은 3상 SRM의 구동을 위한 시스템 구성도를 나타내고 있으며, 구동용 컨버터는 상당 2개의 스위치와 2개의 다이오드로 구성되어 있는 비대칭 브리지형 컨버터를 나타내고 있다. 회전자극이 그림과 같은 위치에 있을 경우 스위치 Qa1과 Qa2가 켜지면 고정자 권선이 여자되어 회전자극이 고정자극과 정렬되려는 방향으로 킬러턴스 토크가 생성된다. 여자되는 고정자극과 회전자극이 정렬되려는 시점 부근에서 Qa1과 Qa2가 꺼지면, 다이오드 Da1과 Da2가 도통되어 권선으로 $-V_s$ 의 전압이 인가되므로 전류가 빠르게 소멸되어 역토크의 생성을 억제한다. 전류지연은 여자되는 동안 고정자 권선에 인가되는 평균전압과 회전속도 및 부하토크의 크기에 비례하여 증가하므로 일반적으로 정렬시점 이전에 Qa1과 Qa2가 턴오프되며, 회전자는 이러한 연속적인 펄스형태의 킬러턴스 토크에 의해 회전하게 된다.

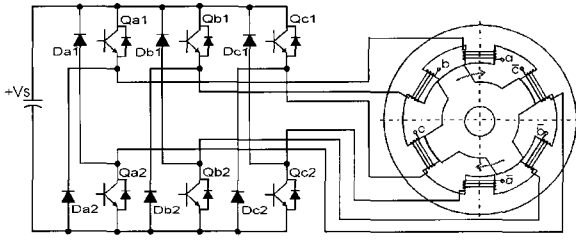


그림 3. 3상 6/4극 SRM의 구동시스템

3. SRM의 에너지 변환원리

3.1 선형적인 해석

SRM에 있어서 기계적으로 변환되는 에너지의 크기는 철심의 자기적인 포화와 프링징 현상을 무시함으로써 용이하게 해석될 수 있으며, 이러한 가정하에서 SRM의 환상의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \omega_m \frac{d\Psi}{d\theta} = Ri + \omega_m \frac{d(Li)}{d\theta} = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \quad (4)$$

여기서 R 과 L 은 각각 고정자 권선의 저항과 인덕턴스이고, Ψ 는 고정자와 회전자 간의 쇄교자속이며, θ 는 회전자 위치, 그리고 ω_m 은 회전자의 각속도를 나타낸다. 또한 Ri 는 권선저항에서의 전압강하이고, $\omega_m i \frac{dL}{d\theta}$ 은 역기전력에 해당된다. 식 (4)로부터 전체 입력에너지 vi 는 다음과 같다.

$$vi = Ri^2 + Li \frac{di}{dt} + \omega_m i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (5)$$

또한, 임의의 시점에서의 자계저장에너지의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} + Li \frac{di}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \omega_m \frac{dL}{d\theta} + Li \frac{di}{dt} \quad (6)$$

따라서 기계적인 에너지로의 전력변환은 입력에너지에서 저항에서의 손실과 자계저장에너지의 변화량을 제외한 나머지에 해당되므로 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{mech} = vi - Ri^2 - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = \frac{1}{2} i^2 \omega_m \frac{dL}{d\theta} = \omega_m T_e \quad (7)$$

따라서 토크 T_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = p_{mech} / \omega_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (8)$$

식 (8)로부터 SRM에서 생성되는 토크는 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 방향과 무관하며, 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화율에 비례함을 알 수 있다^[3].

3.2 비선형적인 해석

SRM이 정격전류에 비해 상당히 낮은 조건에서 운전되는 경우 쇄교자속은 전류의 크기에 비례하여 선형적으로 증가하지만, 전류의 크기가 증가함에 따라 포화로 인해 쇄교자속의 증가율은 감소하게 되며, 그림 4는 1[hp] 3상 6/4극 SRM의 회전자 위치와 전류의 크기에 따른 인덕턴스를 나타내고 있다^{[6](7)}.

선형적인 해석에서와 같이 간략화 된 형태로 토크식이 유도될 수 없기 때문에 기계적으로 변환되는 에너지의 크기는 자화곡선에서의 에너지 변환루프를 통해 알 수 있으며, 그림 5는 포화현상이 존재하는 경우의 자화곡선 및 에너지 변환루프를 나타내고 있다.

에너지 변환루프에서 전체 입력에너지는 자계저장에너지 (Stored-Energy, W_f)와 코에너지(Co-Energy, W_c)로 구분되며,

$$W_f = \int i \, d\Psi$$

$$W_c = \int \Psi \, di \quad (9)$$

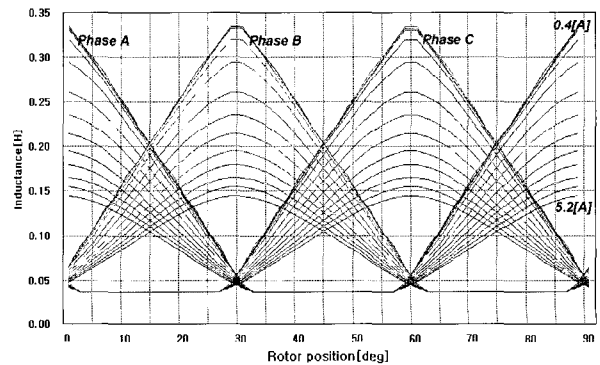


그림 4. 회전자 위치와 전류에 대한 인덕턴스

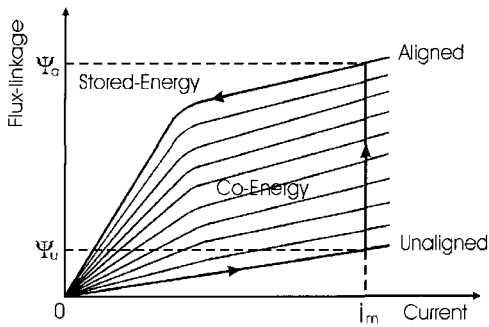


그림 5. SRM의 자화곡선 및 에너지 변환루프

와 같이 나타낼 수 있다. 또한, 토크는 회전자 위치에 대한 코 에너지의 변화량으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} \quad (10)$$

이러한 SRM의 비선형적인 특성은 선형적인 경우에 비해 코에너지의 크기를 증가시키므로 자계저장에너지와 코에너지의 비율인 에너지비(energy ratio)가 증가하게 되지만, 전동기 설계에 있어서는 FEM(finite element method)과 같은 특성해석이 요구되고, 전동기 제어에 있어서는 순시토크의 추정을 어렵게 한다^{[3][6]}.

4. SRM의 운전특성

4.1 속도/토크 특성에 따른 운전영역의 구분

SRM은 펄스형태로 여자되며 전류와 자속이 불연속적이기 때문에 직류기에 기초한 기존의 토크제어이론의 적용이 불가능하며, 고정자 권선이 집중권으로 이루어져 있으며 돌극형의 구조로 인해 공극이 일정하지 않기 때문에 자속기준제어(field-oriented control)기법을 적용할 수 없다. 따라서 정밀 속도제어를 위한 순시토크의 크기는 전동기의 수학적 모델에 따라 순시전류의 크기를 제어함으로써 이루어지며, 토크/속도 특성곡선에서의 운전영역에 따른 전류파형의 특성을 고찰함으로써 전동기의 운전특성을 알 수 있다. 그림 6은 전형적인 SRM의 토크/속도 특성곡선을 나타내고 있으며, 운전영역은 일정토크영역과 일정출력영역, 그리고 출력감소영역으로 구분된다^[3].

4.2 운전영역에 따른 특성

일정토크영역에서는 전동기의 회전속도가 낮기 때문에 전동기에서 발생하는 역기전력은 입력전압에 비해 낮으며, 스위칭 소자의 효율을 통해 상전류의 크기를 조절함으로써 출

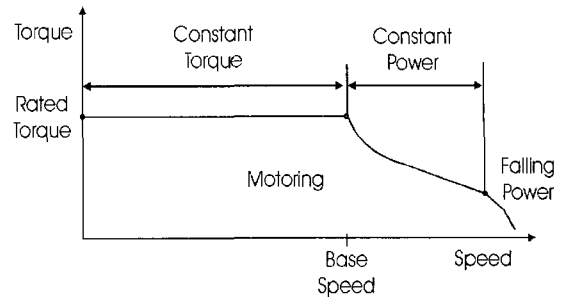
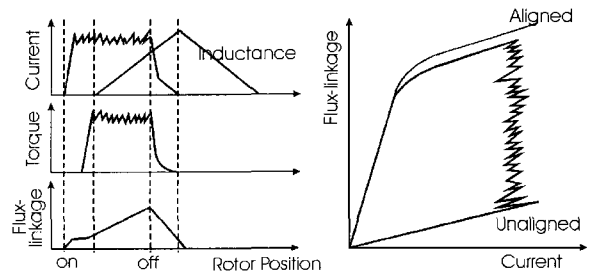
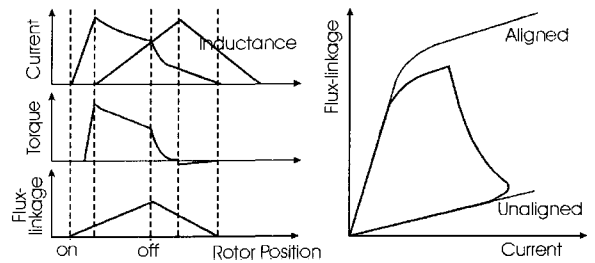


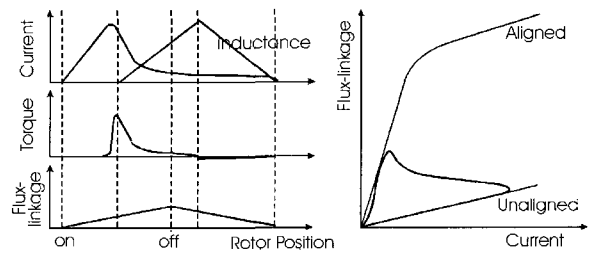
그림 6. SRM의 토크/속도 특성



(a) 일정토크영역



(b) 일정출력영역



(c) 출력감소영역

그림 7. 운전영역에 따른 전류, 토크 및 쇄교자속 파형

력토크를 제어할 수 있다. 또한 인가된 평균입력전압이 입력 단 전압에 비해 낮기 때문에 전류지연시간이 짧아지므로, 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 값이 증가하는 구간 동안에 일정한 전류를 인가함으로써 일정한 토크를 생성할 수 있다.

일정출력영역은 전동기가 기저속도 이상으로 운전되는 영역이며, 속도의 증가에 비례해서 토크가 감소하여 속도와 토크의 곱인 출력이 일정하게 유지되는 영역에 해당된다. 이 영역에서는 부하에 따라 전동기가 회전가능한 최대속도로 운전되기 때문에 스위치는 턴온상태를 유지하게 되는데, 이러한 운전을 단일펄스모드(single-pulse mode)라고 한다.

출력감소영역은 매우 높은 회전속도로 운전되는 경우로써, 출력이 감소하고 토크는 속도 증가율의 제공에 비례해서 급격히 감소하는 운전영역에 해당된다. 속도에 따라 드웰각을 선형적으로 증가시킴으로써 고속운전이 가능하게 된다. 턴온시점 이후에 회전자 위치에 따른 인덕턴스가 증가하기 시작하면 역기전력이 매우 크기 때문에 전류가 급격히 감소하며, 턴오프 이후의 전류지연이 인덕턴스 감소영역까지 이어진다. 그림 7은 각각의 운전영역에서의 전류, 토크 및 쇄교자속 파형과 에너지 변환루프를 나타내고 있다^[3].

5. 결 론

가변 릴럭턴스형 전동기인 SRM은 고정자와 회전자가 모두 돌극형 구조이며, 고정자에만 권선이 존재하고 회전자에는 도체나 영구자석 등이 존재하지 않는 단순한 구조로 이루어져 있다. 이러한 구조와 유사한 스텝모터와는 회전자 위치정보의 검출을 통한 제어방식이나 고속에서의 효율적인 토크생성 측면에서 구분된다.

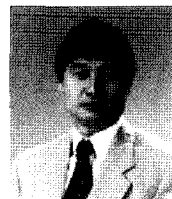
SRM의 운전특성에 많은 영향을 미치는 극수와 극호각의 크기는 전동기가 적용되는 용도에 따라 인덕턴스비와 토크리플 등을 고려하여 적절히 선정되어야 한다. 선형적인 해석을 통해 유도된 토크식으로부터 회전력은 전류의 제곱과 인덕턴스의 변화율에 비례함을 알 수 있으며, 토크의 극성은 전류의 극성과 무관하므로 구동용 스위칭 소자의 저감이 가능하고 인덕턴스 비의 증가를 통해 생성되는 회전력의 크기를 증가시킬 수 있다. 또한, 순시토크의 크기는 전동기의 수학적 모델에 따라 순시전류의 크기를 제어함으로써 이루어지며, 토크/속도 특성곡선에서의 운전영역에 따른 전류파형의 특성을 고찰함으로써 전동기의 운전특성을 알 수 있다.

높은 효율로의 가변운전과 고속운전이 가능하고, 구조적으로 견고하므로 유지, 보수 측면에서도 많은 장점을 지니고 있는 SRM은 지속적인 특성개선과 제어기법에 대한 연구를 바탕으로 향후 산업 전반에 걸쳐 적용이 확대될 것으로 기대되고 있다. ■

참 고 문 헌

- [1] T.J.E. Miler, Switched Reluctance Motor Drives, Intertec Communications Inc., 1988.
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
- [3] T.J.E. Miler, Electronic Control of Switched Reluctance Machines, Newnes Press, 2001.
- [4] H.C. Lovatt and J.M. Stephenson, "Influence of number of poles per phase in switched reluctance motors", IEE Proc.-B, Vol. 139, No. 4, pp. 307~314, July 1992.
- [5] M. Besbes, C. Picod, F. Camus, and M. Gabsi, "Influence of stator geometry upon vibratory behaviour and electromagnetic performances of switched reluctance motors", IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 145, No. 5, pp. 462~468, Sep. 1998.
- [6] 최경호, 김동희, 노채균, 김민회, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, Vol. 6, No. 4, pp. 333~340, Aug. 2001.
- [7] 김민회, 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, "디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 논문지, Vol. 7, No. 3, pp. 253~261, June 2002.
- [8] 안진우, 오석규, 황영문, "SRM의 정밀속도제어를 위한 순시스위칭각 제어방식", 전력전자학회 논문지, Vol. 2, No. 3, pp. 20~25, Sep. 1997.
- [9] 정선용, 장도현, 최규하, "순시전압제어방식을 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토크 리플 저감", 전력전자학회 논문지, Vol. 2, No. 3, pp. 11~19, Sep. 1997.

〈 저 자 소 개 〉



김민회(金玟會)

1953년 7월 23일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1979년 3월~현재 영남이공대학 전자자동차학과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과, 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수 논문상수상. 당 학회 재무이사.



백원식(白元植)

1970년 10월 20일생. 1996년 계명대 수학과 졸업. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.