JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 20, No. 1 : 131~141 Jan. 2016

Switched Reluctance Motor의 자기적 구조에 대한 비교 해석

오석규*

Comparison and Analysis on magnetic structures of Switched Reluctance Motors

Seok-Gyu Oh*

Department of Mechatronics Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology(GNTECH), Jinju, 660-758, Korea

요 약

SRM은 저비용, 간단한 자기구조, 넓은 운전속도, 높은 효율, 직류전원과의 우수한 결합성 등의 장점을 가진 전동기구이다. SRM의 토오크는 자속의 방향과는 무관하여 자기구조의 배치가 유연한 특성을 가지고 있어 다양한 자기구조를 가지고 있다. 본 논문에서는 자속방향에 따라 Radial-Flux SRM와 Axial-Flux SRM로 크게 나누었고 기계적인 구조의 차이에 따라 Radial-Flux SRM에는 Conventional, Segmented stator and rotor, Double stator SRM 로, 그리고 Axial-Flux SRM에는 C-core stator와 Axial-airgap SRM로 분류하였고 각각에 대해 비교 해석하여 적절한 용도에 최적의 자기구조를 선택할 수 있도록 각각의 기본적인 특성을 제시하였다.

ABSTRACT

SRM is designed to meet operating standards such as low cost, simple magnetic structure, a desired operating speed range, high efficiency, high performance, and good matching for DC power. The magnetic flux of SRM is independent of its direction to develop a torque and it allows the flexible characteristics of the magnetic structure for SRM. In this paper, SRM can widely classify two types, Radial-Flux SRM and Axial-Flux SRM, according to the flux direction. Radial-Flux SRM includes Conventional, Segmented stator and rotor, and Double stator SRM, etc. and Axial-Flux SRM includes C-core stator and the Axial-airgap SRM. This paper is subjected the basic characteristics to select the best of the magnetic structure of SRM in the appropriate application by the classification of SRM.

키워드 : 자기구조, Radial-Flux SRM, Axial-Flux SRM, 분류

Key word : magnetic structures, Radial-Flux SRM, Axial-Flux SRM, classification

접수일자 : 2015. 10. 02 심사완료일자 : 2015. 11. 20 게재확정일자 : 2015. 12. 04

* **Corresponding Author** Seok-Gyu Oh(E-mail:sgoh@gntech.ac.kr, Tel:+82-55-751-3385)
Department of Mechatronics Engineering, Gyeongnam National University of Science and Technology(GNTECH), Jinju, 660-758, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.1.131 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

일반적으로 전동기구를 구동하는 토오크는 두 가지 종류가 있다. 한 가지는 두 개의 자석이 서로 밀고 당기는 힘을 이용하는 상호 토오크(Mutual Torque)이고 다른 한 가지는 자석이 쇠붙이를 당기는 것과 같은 힘을 이용하는 릴럭턴스 토오크(Reluctance Torque)이다. 상호 토오크는 오래전부터 사용되고 있는 거의 대부분의 전동기구(유도기, 동기기, 직류기 등)에서 사용되어 온 방식이다. 그러나 릴럭턴스 토오크의 기본 개념은 전동기가 개발된 초기부터 알려져 있었지만 광범위하게 사용되어지지 않고 극히 제한된 부분에서만 적용되어 왔다[1-3].

반도체를 이용한 무접점 스위칭 소자의 개발이후 전력전자 기술의 발달로 인하여 1970년대는 소용량의 펄스형 전원을 이용한 VR형 스텝핑 전동기가 실용화되었고, 1980년대 초에는 대용량의 전력용 반도체의 실용화 개발로 인하여 대용량의 가변 릴럭턴스 전동기가 그 효용성을 인정받기에 이르렀다[1-3].

1980년 Lawrenson 교수팀에서 릴럭턴스 전동기구중 하나인 SRM (Switched Reluctance Motor)의 기본 설계에 관한 논문이 발표 이후 SRM이 활발히 연구, 개발되고 있다[1]. SRM은 릴럭턴스 토오크를 극대화 하는 이중 돌극형 구조를 가지고 있고, 고정자 극에는 간단한 형태의 집중권으로 감겨 있고, 회전자에는 어떤 형태의 권선이나 영구자석이 없이 적층된 철심으로만 이루어진 간단하고 강인한 자기적 구조를 가지고 있다. 이런 간단한 구조는 전동기의 단가를 낮출 수 있다. 그리고 고정자 권선에만 전원을 인가하는 단일여자방식은 효율을 극대화할 수 있다. 또한 고속운전을 포함한 넓은 범위의 운전속도와, 직권직류전동기의 속도-토오크 특성과 유사한 특성을 가지고 있다.

SRM에 대한 개발연구는 기계적 출력의 극대화 및 고효율화, 운전 정도 및 신뢰도, 그리고 드라이브시스템의 향상을 위한 적정설계와 제어, 운전특성의 안정화를 위한 토오크 리플과 소음 및 진동 등에 대한 연구가 활발히 추진되고 있다[4-18].

SRM은 릴럭턴스 토오크의 특성상 자기적 구조에 대한 자유도가 높은 특징을 가져 다양한 자기구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근까지 개발되고 있는 SRM을 분류하면 그림 1과 같다. 크게 상권선에 의해 만들어진 자속의 방향에 따라 나눌 수 있다. 각각의 회전자 자극에 자속이 방사방향으로 작용하는 방식(Radial-Flux)와 최근에 많이 연구되는 축방향으로 작용하는 방식(Axial-Flux)으로 분류할 수 있다. Radial-Flux SRM은 가장 일반적인 3상 6/4 SRM, 2상 4/2 SRM 과 같은 구조의 Conventional SRM[19-26], E-core SRM와 같이 고정자가 분리되는 Segmented Stator SRM [27-29], 회전자의 자극을 분리하는 Segmented Rotor SRM[30-33], 그리고 이중 고정자를 갖는 double stator SRM[34] 등이 이에 속한다. 그리고 원판 모양의 회전자에 분리된 C-core Stator SRM[35]과 회전자와 나란히 붙어 있는 Axial-Airap SRM[36-38]은 Axial-Flux SRM에 속한다.

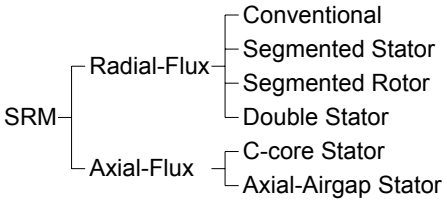


Fig. 1 Classification of SRMs

본 논문은 최근까지 연구되어 온 그림 1의 각각의 SRM에 대한 자기적 구조와 동작특성에 대해 비교 분석하였다. 이를 통해 다양하게 제시된 SRM을 용도에 맞는 구조를 선택하는데 도움이 되고자 한다.

Ⅱ. SRM의 동작 특성

SRM은 고효율 운전특성과 간단한 구조로 인하여 저가의 드라이브 시스템을 구성할 수 있는 장점 등으로 인하여 많은 분야에 적용되고 있다. SRM은 집중권으로 되어 있는 고정자 상권선에 펄스 전원을 인가하여 철심으로만 구성된 회전자를 릴럭턴스를 최소화 하는 방향으로 회전한다[1-3]. 고정자에만 상권선이 있어 모든 저항손은 고정자에서만 발생함으로 상대적으로 고정자의 냉각이 효과적이고 쉬워 정격에 비해 작은 크기의 전동기를 만들 수 있다[2, 3].

2.1. SRM의 기본 운전특성

SRM 드라이브 시스템은 기계적 에너지변환을 주도하는 전동기부, 상권선에 스위칭 펄스를 인가하는 스위

칭 인버터부, 회전자 위치검출부, 그리고 운전조건을 제어하는 제어부로 구성된다[1-3]. 그림 2는 SRM 드라이브 시스템의 일례를 보여주고 있다.

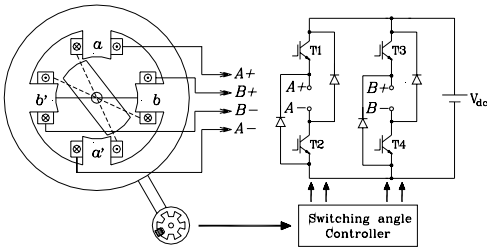


Fig. 2 SRM drive system

그림 2에서는 SRM은 고정자, 회전자 모두 돌극형으로 되어 있고 고정자극이 4개, 회전자 극이 2개인 2상 4/2(고정자극/회전자극) SRM 드라이브 시스템을 보여주고 있다. 각 고정자 극 권선은 마주보는 고정자 극 권선과 직렬로 연결되어 상권선을 이루고 각 상은 분리되어 있다[1-3].

그림 2에서 A 상에 여자전류를 흘리면 릴럭턴스가 최소로 되는 방향, 즉 인덕턴스가 최대가 되는 방향(시계방향)으로 회전자는 회전할 것이다. 따라서 회전자의 위치에 따라 고정자 권선에 적절한 여자전류를 인가하여야 하기 때문에 회전자 위치검출 센서가 필요하다. 또한 회전자 위치에 따라 고정자 권선에 여자하기 위해 마이크로 프로세스를 이용한 스위칭 각 제어를 하는 제어부가 필요하다[1-3].

회전자 위치검출에 의하여 스위칭 반도체소자로 조성된 펄스에너지를 고정자 권선에 여자하여 출력토오크를 내고 잉여 여자에너지를 회수하는 과정에서 에너지 흐름을 효과적으로 조정함으로써 성능이 우수한 전동력 시스템을 갖게 한다. 또한 그림 2에서 보는 바와 같이 고정자 상권선은 상스위치 소자와 직렬로 연결되어 있어 교류전동기 제어용 인버터에서 심각한 문제를 발생시키는 상 단락사고(shoot through fault)는 SRM 드라이브 시스템에서는 발생하지 않는다[2, 3].

SRM의 상권선에 직류전압을 인가하면 전류가 흐른다. 이 때 전압방정식은

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta)}{dt} = Ri + \frac{d}{dt}[L(\theta)\,i] \qquad (1)$$
$$= Ri + \frac{dL(\theta)}{dt}i + L(\theta)\frac{di}{dt}$$

와 같다. 여기서 R은 상저항, i는 상전류, λ는 자속쇄교수, θ는 회전자 위치각, 그리고 $L(\theta)$는 회전자 위치에 따른 인덕턴스를 각각 나타낸다. 그리고 식(1)을 양변에 전류를 곱하면 SRM의 에너지 흐름을 알 수 있으며, 식(2)와 같다. 즉, 전기에너지는 상저항손, 철심에 축적된 자기에너지, 그리고 기계적인 출력으로 나타난다. 철심에 축적된 자기에너지는 별도의 귀환회로를 통하여 전원에 회생된다[2, 9].

$$Vi = Ri^2 + \frac{d}{dt}[\frac{1}{2}L(\theta)\,i^2] + \frac{1}{2}i^2\frac{dL(\theta)}{d\theta}\omega \qquad (2)$$

여기서 ω는 회전자 각속도를 나타내고 있다.

SRM의 발생토오크, T는 식(3)에서 보는 바와 같이 전류의 제곱에 비례하고 회전자 위치각에 대한 인덕턴스의 기울기에 비례함을 알 수 있다. 토오크가 전류의 제곱에 비례함으로서 상전류의 방향과 무관하게 인덕턴스 기울기에 따라 토오크의 방향이 결정된다[1-3].

$$T = \frac{1}{2}i(\theta)^2 \cdot \frac{dL(\theta)}{d\theta} \qquad (3)$$

회전자가 회전함에 따라 고정자 극과 회전자 극의 상대적인 위치에 따라 인덕턴스가 변하게 된다. 식(4)는 회전자 위치각에 따라 변화하는 인덕턴스를 보여주고 있다[2, 3].

$$L(\theta) = \frac{N^2}{\Re} = \frac{N^2}{\frac{l}{\mu A}} = \frac{N^2\mu A}{l} = \frac{N^2\mu(r\theta S)}{l} \qquad (4)$$
$$= \frac{N^2\mu r S}{l}\theta$$

여기서 N은 상권선 턴수, $\Re$은 릴럭턴스, μ는 투자율, l은 자속경로 길이, A($=r\theta S$)는 고정자극과 회전자극이 겹치는 단면적, r은 공극 반지름, 그리고 S는 전동기 철심 두께를 각각 나타내고 있다. 따라서 인덕턴스는 회전자 위치각에 따른 함수로써 나타낼 수 있다.

그림 3은 회전자 위치각에 따른 인덕턴스를 보여주고 있다[1-3]. A 구간은 고정자극에 회전자극이 접근하지 않은 구간으로 릴럭턴스가 최대, 인덕턴스가 최소인 구간이다. 이 구간에서 스위칭 온을 하여 토오크 발생구간인 B 구간에서 필요한 전류를 확립한다.

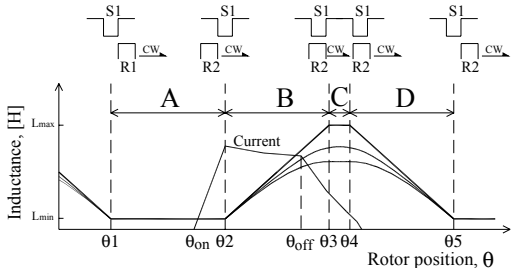


Fig. 3 Inductance profile per one phase

B 구간은 회전자 위치각 $\theta 1$ 에서 회전자극이 고정자극에 접근함으로써 인덕턴스가 상승하기 시작하여 고정자극과 회전자극이 완전히 겹치는 회전자 위치각 $\theta 2$ 즉, 최대인덕턴스까지 상승한다. 이 구간에서 전류가 흐르면 인덕턴스 기울기에 비례하여 정토오크가 발생한다. 이 구간은 공극이 매우 작기 때문에 자기포화가 발생하게 되고 전류가 많이 흐를수록 자기포화는 심해진다. 따라서 SRM의 인덕턴스는 전류레벨에 따라 포화정도가 큰 비선형 해석을 해야 한다[2, 3].

C 구간은 인덕턴스 최대 구간으로써 고정자 극호(pole arc)와 회전자의 극호의 차이로 나타난다. 이 구간은 인덕턴스의 기울기가 0이기 때문에 전류가 흘러도 토오크가 발생하지 않는 구간으로 부토오크가 발생하는 D 구간이전에 전류를 억제하기 위한 구간이다.

D 구간은 회전자극이 고정자극을 떠나는 구간으로써 이 구간에서는 전류의 방향과 관계없이 부토오크가 발생하기 때문에 이 구간이전에 흐르는 전류를 적절하게 억제하여야 한다.

SRM에서 최적의 토오크를 발생시키기 위해서는 그림 3에서 보듯이 최소인덕턴스(Lmin) 구간(A 구간)에서 스위치 온(θon)하여 토오크 발생에 필요한 전류를 확립하고 토오크 발생 구간(B 구간)에서 적정 전류가 흐르게 한다. 또한 부토오크가 발생하는 구간(D 구간)에서 전류를 억제하기 위해서 최대인덕턴스(Lmax) 구간(C 구간)이전에 스위치 오프(θoff)를 한다[1-3, 9].

2.2. SRM의 인버터의 동작특성

정토오크가 발생하는 인덕턴스 상승구간에서 원하는 토오크를 발생시키기 위해 적절한 전류를 제어하여 흐르게 하는 것이 인버터의 역할이다. 전류를 제어하기 위해 스위칭 온각, 스위칭 오프각을 제어하고, 기저속도(base speed)아래에서는 전류레벨을 제어하기 위해서 쵸핑(chopping)을 한다. 그림 2에서 인버터는 SRM의 대표적인 인버터인 비대칭 브리지 인버터(Asymmetric inverter)를 보여주고 있다[3,8]. 이 인버터는 각상이 독립적으로 동작되고 각상 소자와 직렬로 연결되어 있어 강인한 제어가 가능하다.

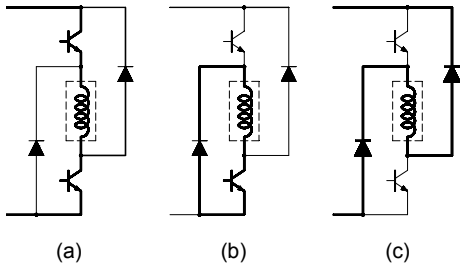


Fig. 4 Operation of inverter in SRM drive system (a) exciting (b) free-wheeling (c) demagnetizing

그림 4와 같이 3가지 동작이 가능하다[3, 9]. 그림 4(a)는 상권선에 전원을 인가하는 스위치 온 상태이며, 그림 4(b)는 전류를 제한할 때 사용되며 상권선에 0 전압을 인가한다. 그림 4(c)는 스위치 오프 상태이며 이때는 상 권선에 저장된 자기에너지를 전원으로 회생하는 동작을 한다.

Ⅲ. SRM의 자기적 구조에 대한 고찰

최근에 SRM이 다양한 응용분야에 적용되면서 다양한 형태의 자기적 구조를 갖는 SRM이 개발되고 있다. 3, 4상의 SRM은 안정적인 성능을 보여주어 중대형에 적합하다. 또한 가격경쟁력이 중요한 소형의 가변속 전동기구는 인버터 비용을 절약할 수 있는 1상 혹은 2상의 다양한 SRM이 개발되고 있다. 또한 고정자 혹은 회전자를 분리한다던가, 자속의 방향이 축방향으로 흐르도록 하는 등 자기적 구조가 기존의 SRM과 상당히 다른 특수목적의 전동기도 연구 개발되고 있다.

3.1. SRM의 자기적 구조

상호 토오크를 사용하는 교류전동기에서는 고정자 자속과 회전자 자속의 방향을 고려하여 제어해야 하지만, 릴럭턴스 토오크를 사용하는 SRM은 자속의 방향과

는 무관하여 자기적 구조의 배치가 유연한 특성을 가지고 있다.

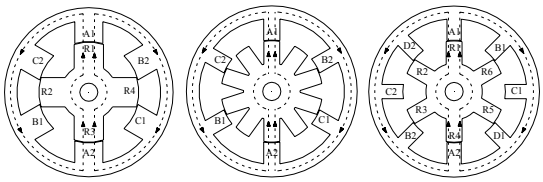
그림 1은 기계적인 구조의 특징에 따라 SRM을 분류한 것이다. 자속 방향에 대한 분류인 Radial-Flux SRM과 Axial-Flux SRM 의 차이는 회전자 형태가 가장 큰 변화이다. 일반적인 전동기의 형태를 취하고 있는 Radial-Flux SRM 과 달리 Axial-Flux SRM은 회전자가 원판 모양으로 자속이 축방향으로 흐른다. Radial-Flux SRM 중 가장 일반적인 형태인 Conventional SRM은 자기동(self starting) 능력에 따라 분류할 수 있다. 자기동 능력은 전동기구가 갖추어할 중요한 요건 중에 하나이다. SRM에서 자기동 능력의 판단은 (고정자 극수/회전자 극수)의 비가 정수이면 자기동 능력이 없고 정수가 아니면 자기동 능력이 있다[3]. 그림 5, 6, 7의 SRM이 Conventional SRM에 속하는 대표적인 SRM이다.

그림 5는 자기동이 가능한 가장 대표적인 3상, 4상 SRM을 보여주고 있다. 그림 5의 전동기는 (고정자 극수/회전자 극수)의 비가 정수가 아님으로 자기동 능력을 갖춘 전동기이다. 또한 그림에서 점선은 A상을 여자하였을 때 나타나는 자속분포를 보여주고 있다. 그리고 경우에 따라 배수의 극수를 갖는다. 3상 12/8 SRM은 3상 6/4 SRM의 배수의 극을 가지고 있고 고정자 4극이 한 상으로 구성되어 사용목적에 따라 배수의 극을 갖는 전동기가 사용된다.

그림 6은 대표적인 2상 SRM을 보여주고 있다. 일반적으로 2상의 SRM은 (고정자 극수/회전자 극수)의 비가 정수이여서 자체로는 자기동 능력이 없기 때문에 기동을 하기 위해서는 자기구조를 변형하거나 기동을 위한 보조 장치를 필요로 하다. 이로 인해 비용이 추가되고 성능이 저하된다. 최근에는 회전자극 형상을 공극이 일정한 구간과 공극이 각도에 비례하여 커지게 하여 연속적인 토오크를 발생하게 하는 방법[20, 24]이 사용되어 부가적인 보조 장치도 없고 성능저하 없는 저가의 2상 SRM이 연구개발 되고 있다. 그러나 이러한 SRM은 단방향 운전에만 가능하여 양방향 운전을 요구하는 곳에는 사용할 수 없는 단점이 있다[20-24].

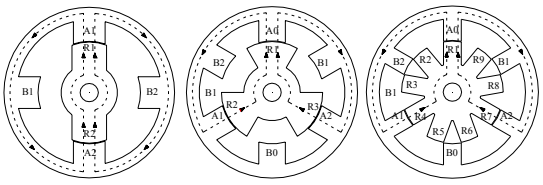
그림 7은 단상 SRM을 보여주고 있다. 단상 SRM은 자기적인 구조를 변화만으로 기동을 시킬 방법이 없어 보조 극에 영구자석을 사용하거나 그림 7(b)처럼 보조극과 보조권선 등을 사용하여 기동시키는 방법을 사용하고 있다[19]. 따라서 단상 SRM은 자기동 능력이 없는 만큼 외부의 부가적인 장치를 부착해야 한다.

그림 8은 그림 6(b)의 2상 6/3 SRM의 FEM 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. A 상을 여자하였을 때 자속과 자속밀도를 보여주고 있다.



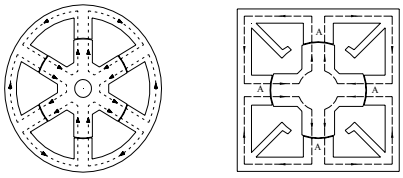
(a) (b) (c)

Fig. 5 SRM with self-starting capability (a) 3-phase 6/4 (b) 3-phase 6/10 (c) 4-phase 8/6



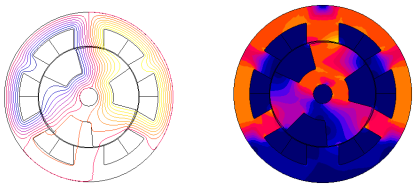
(a) (b) (c)

Fig. 6 Two-phase SRM (a) 2-phase 4/2 (b) 2-phase 6/3 (c) 2-phase 6/9



(a) (b)

Fig. 7 Single-phase SRM (a) single-phase 8/8 (b) single-phase 4/4

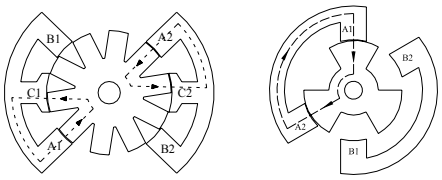


(a) (b)

Fig. 8 A simulation of 2-phase 6/3 SRM by FEM (a) flux (b) flux density

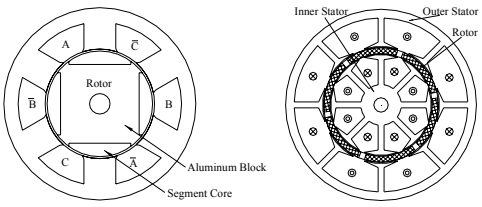
소형 전동기구 분야에서는 성능뿐만 아니라 가격경쟁력도 중요한 요소 중에 하나이다. Segmented Stator SRM 은 고정자에 자속이 흐르는 부분만을 분리한 형태

로 고정자의 철심을 절약할 수 있을 뿐만 아니라 고정자에서 발생하는 철손도 저감할 수 있는 효과가 있다. 그림 9는 대표적인 Segmented Stator SRM을 보여주고 있다[27-29].



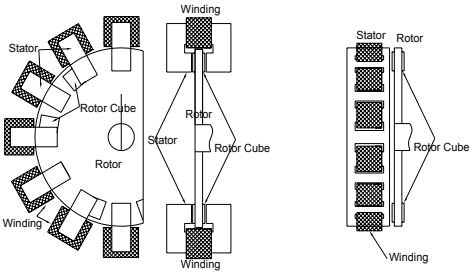
(a) (b)

Fig. 9 SRM with separated stator (a) E-core (b) 2-phase 4/3



(a) (b)

Fig. 10 Segmented rotor SRM and double stator SRM (a) Segmented rotor (b) Double stator



(a) (b)

Fig. 11 Axial-Flux SRM (a) C-core stator (b) Axial-airgap

그림 10은 Segmented Rotor SRM[30-33]과 Double Stator SRM[34]을 각각 보여주고 있다. 이들 SRM은 교류전동기와 유사한 전절권 권선을 채택하고 있다. 그림 10(a)의 경우, 회전자는 투자율이 공기와 유사한 알루미늄에 분리된 철심을 그림과 같이 부착한 형태를 하고 있다. 그림 10(b)의 경우, 전동기의 안쪽과 바깥쪽에 이중으로 고정자가 위치하고 있고 그 중간에 회전자가 위치하는 복잡한 구조를 가지고 있다.

그림 11은 최근에 전기자동차을 위한 전동기로써 개발되고 있는 Axial-Flux SRM을 보여주고 있다. 일반적으로 자속이 회전자에 방사방향으로 흐르는 것과 달리 축방향으로 흐르고 있다. 그림 11(a)는 집중권이 감긴 독립된 C-core stator[35]에 팬케잌 모양의 회전자를 보여주고 있다. 고정자 권선에 분리되어 있어 열전달에 유리한 조건을 가진다. 그리고 11(b)의 Axial-airgap [36-38]는 고정자가 회전자와 나란히 붙어 축방향의 공극이 일정한 형태를 보여주고 있다.

3.2. SRM의 인버터 특성

SRM은 회전자 위치각에 따른 펄스 전원을 상권선에 인가하여 회전자를 구동시키는 방식을 취하고 있어 상권선에 펄스 전원을 인가하는 인버터가 꼭 필요하다.

인버터는 먼저 기자력전류를 조정할 수 있도록 기저속도이하의 저속에는 권선에 인가되는 전압을 제어할 필요가 있다. 전압이나 전류PWM제어가 바람직하다. 그리고 스위칭 오프 이후 빠른 전류의 소호를 위해 높은 감자전압이 필요하다. 또한 각상 전류가 독립적으로 제어되고 감자기간 동안 상권선에 저장된 자기에너지의 회생이 가능하여야 한다[2, 8-11]. 이런 특성을 갖는 인버터는 Asymmetric inverter, Miller inverter, Buck-boost inverter, C-dump inverter, Sood inverter 그리고 단상용 인버터 등이 있으며, 이 중 대표적인 SRM 인버터는 그림 12와 같다[8-11]. 그림에서는 2상 SRM을 위한 인버터를 보여주고 있다. 그림 12의 인버터의 각 특징은 표 1과 같이 정리할 수 있다.

Asymmetric inverter 는 각 상이 독립되어 각 상전류의 중첩이 가능하며 제어방법이 가장 간단하며 인가전압과 역전압이 같은 특징을 가지고 있어 안정적인 운전이 가능하여 일반적으로 많이 사용되는 방식이다.

Miller inverter는 스위칭 소지와 다이오드의 숫자가 줄어 경제적인 장점이 있지만 부분적으로 상 독립이 안되기 때문에 정밀 제어 분야에는 사용이 제한된다.

C-dump inverter는 보조 커패시터를 사용하여 높은 역전압을 인가할 수 있어 전류소호를 빨리 할 수 있는 장점이 있다. 이에 대한 많은 유사한 형태의 inverter가 개발되고 있는 반면에 제어가 복잡하고 사용되는 소자의 수도 많다. Split DC inverter는 스위칭 소자나 다이오드를 많이 줄일 수 있는 장점이 있으나 짝수 상에만 사용할 수 있고 제어성능이 떨어진다. Bifilar winding

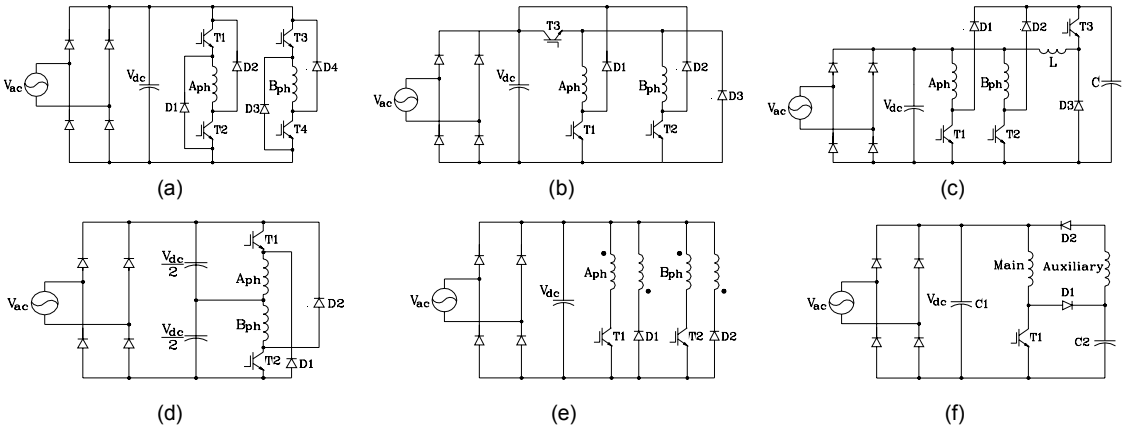


Fig. 12 Inverters of SRM (a) Asymmetric inverter (b) Miller inverter (c) C-dump inverter (d) Split DC inverter (e) Bifilar winding inverter (f) Single phase inverter

inverter는 한상 권선에 각각 2개의 권선을 감아 주권선으로는 여자전류를 흘리고 보조권선은 스위치 오프시 에너지 회생에 사용된다. 적절한 권선비는 높은 역전압을 인가할 수 있다. 그리고 한 상당 스위치와 다이오드가 각각 1개씩 사용된다. 저전력용으로 사용된다. 단상 inverter는 4상한제어가 가능하지만 제어가 복잡하고 그림 7(b)의 자기구조에서만 동작한다[11].

Table. 1 The characteristics of SRM's inverter

Inverter	Switch	Diode	C (L)	Phase independence	Performance
(a)	2N	2N	1	Yes	Very Good
(b)	N+1	N+1	1	No	Good
(c)	N+1	N+1	2(1)	Yes	Fair
(d)	N	N	2	Partial	Good
(e)	N	N	1(1)	Yes	Low
(f)	1	2	2	No	Low

* Inverter(Fig. 12), N : No. of phase

인버터의 구성 부분에서는 요구되는 성능과 가격에 따라 달라질 수 있다. Asymmetric inverter가 가장 안정적이며 제어 성능도 뛰어나 많이 사용되는 인버터이다. 승압용 인버터(booster inverter)인 C-dump inverter의 경우 높은 역전압을 인가하여 감자구간을 짧게 할 수 있어 장점으로 인해 많은 유사한 인버터가 개발되고 있다. Miller inverter, Split DC inverter, 그리고 Bifilar inverter와 같이 저가의 인버터를 구성하여 더욱 가격을 낮출 수 있는 조합이 가능하다.

Ⅳ. SRM의 특성 비교 분석

SRM은 릴럭턴스를 이용한 자기 구조를 가지고 있어 다양한 고정자와 회전자 구조를 가질 수 있다. 이런 다양한 SRM의 특성을 비교 분석하고자 한다.

SRM은 순차적으로 각 상권선에 펄스형 전원을 인가하여 구동시키는 방법을 사용하기 때문에 한 순간에 한 상만 작동하는 것이 일반적이다. 순차적으로 각 상권선에 전원이 인가되면 자속이 발생하고 이 자속은 고정자와 회전자의 자로에 흐르게 된다. 그림 13은 그림 5(a), 그림 6(b)의 고정자 각 부분의 자속의 변화를 보여주고 있다[1, 20].

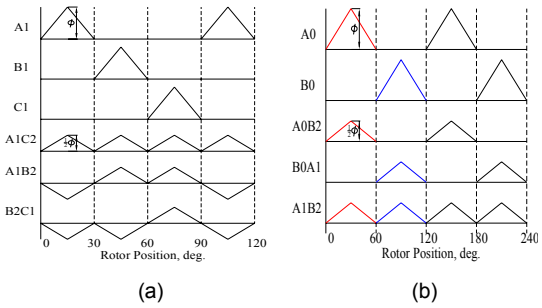


Fig. 13 Flux patterns of SRM (a) 3-phase 6/4 SRM (b) 2-phase 6/3 SRM

그림 13(a)는 그림 5(a)의 3상 6/4 SRM의 고정자 각 부분을 보여주고 있다. 여기서 A1은 SRM의 고정자극

Table. 2 The characteristics of SRM

No	Phases	Stator poles / rotor poles	Pulse / phase/ revolution	Pulse / revolu-tion	f_{ph}	f_s	θ_{stroke}	Flux -reversal in stator	Characteristics	Application	Remarks
1	3	6/4	4	12	240	720	30	Yes	Bi-direction	middle and large	Fig. 5(a)
2	3	6/10	10	304	600	1800	12	Yes	Bi-direction	middle and large	Fig. 5(b)
3	4	8/6	6	24	360	1440	15	Yes	Bi-direction	middle and large	Fig. 5(c)
4	2	4/2	2	4	120	240	90	Yes	Uni-direction	small	Fig. 6(a)
5	2	6/3	3	6	180	360	60	No	Uni-direction, Eccentric load	small	Fig. 6(b)
6	2	6/9	9	18	540	1080	20	No	Uni-direction, Eccentric load	small	Fig. 6(c)
7	1	4/4	4	4	240	240	90	No	Bi-direction, Auxiliary pole and winding	small	Fig. 7(b)
8	2	6/10	10	20	600	1200	18	No	Uni-direction	small	Fig. 9(a)
9	2	4/3	3	6	180	260	60	No	Uni-direction, Eccentric load	small	Fig. 9(b)
10	3	6/4	4	12	240	720	30	Yes	Bi-direction, Full-pitch winding	middle and large	Fig. 10(a)

A1을 지나는 자속을 보여주고 있으며, A1C2는 고정자 극 A0과 B2사이의 고정자 요크(yoke)부위의 자속의 변화를 보여주고 있다. 일반적으로 SRM의 고정자와 회전자 각 부분의 자속은 일부분은 자속이 A1C2처럼 비반전하지만 A1B2처럼 반전(Flux-reversal)하는 부분도 있다. 자속의 반전은 철손을 증가하는 원인이 된다. 그림 13(b)는 그림 6(b)의 2상 6/3 SRM의 고정자 각 부분을 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 고정자에서는 자속이 반전되는 부위가 없고 한상이 여자할 때 고정자 전체 자로의 2/3만 자로가 형성되어 철손을 줄일 수 있어 고효율 운전이 가능하다.

표 2는 각 SRM의 특성을 정리한 것이다. 여기서 편심(Eccentric load)은 상권선에 스위칭할 때 회전자 축이 방사방향으로 힘이 작용하여 전동기 진동의 원인될 수 있는 경우이다[14-18]. 이 경우에도 배수의 극을 갖는 전동기를 설계하여 편심의 영향을 없앨 수 있다.

SRM에서 한 상의 스위칭 주파수는 식 (5)와 같다[2].

$$f_{ph} = P_r \ \omega / 60 \tag{5}$$

여기서 P_r은 회전자 극수이고, ω는 회전자속도[rpm]이다. 그리고 전체 스위칭 주파수 f_s는 다음과 같다.

$$f_s = q \, P_r \ \omega / 60 \tag{6}$$

여기서 q는 상수이다. 또한 한 스위칭에 의해 회전자가 회전하는 각 θ_{stroke} 은

$$\theta_{stroke} = \frac{360}{q \, P_r} \tag{7}$$

와 같다.

중대형 SRM은 안정적이고 양방향 운전이 가능한 3상 혹은 4상의 SRM이 적합하다. 소형 전동기구 경우 성능과 경제성이 갖추어야 경쟁력이 있으므로 2상이나 단상이 적당하지만 단상의 경우 기동을 위해 영구자석이나 그림 7(b)와 같이 보조극과 보조 권선이 필요한 복잡한 자기구조와 기동시 초기 정렬이 필요한 단점이 있다. 그러나 양방향운전이 필요한 곳에 2상 SRM보다 우수한 특성을 보인다. 2상 SRM은 단방향 운전에 한해 소형전동기구에 적합한 특성을 가지고 있다. 특히 4/2, 6/3, 4/3 SRM의 경우 스위칭 주파수도 적어 스위칭 손

실도 줄일 수 있어 고효율 운전이 가능하다. 인버터 구성 소자의 절감은 경제적 장점을 가지며, 고정자에서 자속의 반전이 없는 경우 철손이 줄어 효율적인 면에서 우수한 특성을 갖는다. 다만 편심을 갖는 전동기의 경우 진동이 큰 적용대상에는 배수의 극을 사용하는 것이 좋다. 3상 12/8 SRM의 경우 6/4 SRM보다 상 스위칭 주파수가 2배로 높아 인버터 손실이 증가하는 반면에 토오크 리플이 적고 저속운전에 적합한 특성을 가진다. 그림 9(b)의 2상 4/3 SRM의 경우, 극을 배수로 하여 2상 8/6 SRM로 하였을 때는 편심의 영향이 없어 진동이 있는 응용에도 사용이 가능하다. 그림 11의 SRM 경우 특수목적, 견인용으로 사용되기 위해 개발되고 있는 전동기로서 기계적 구조가 복잡한 단점이 있으나 부피당 토오크가 큰 장점이 있다.

V 결 론

최근에는 산업용뿐만 아니라 가정용 구동시스템은 정밀제어가 가능한 가변속 전동기구가 사용되어 다양한 형태의 전동기구가 연구 개발되고 있다. 릴럭턴스 토오크를 사용하는 SRM은 간단한 자기구조를 가진 고효율 전동기구로서 연구 개발이 활발히 진행되고 있다. 또한 직류전원과 결합성이 좋아 독립직류전원에 사용하기도 좋은 장점을 가지고 있다. 그리고 릴럭턴스 토오크를 사용하기 때문에 다양한 자기구조를 갖는 것이 가능하여 다양한 적용분야에 유연하게 적용할 수 있다.

본 논문에서는 그동안 연구 개발된 다양한 자기적 구조를 갖는 SRM을 정리하였으며, 각각 특성을 비교 분석하여 각 SRM이 갖는 장단점을 제시하여 적절한 용도에 사용될 수 있도록 하였다.

자기동이 가능한 3, 4상 SRM은 성능이 우선시 되는 중대형 전동기구에 적합하다. 소형 전동기구는 성능과 경제성이 같이 동반되어야 경쟁력이 있으므로 단상이나 2상 SRM이 적당하다. 단상의 경우는 기동을 위해서는 별도의 장치가 필요하여 사용이 제한되나 저가의 시스템을 구성할 수 있다. 2상 SRM은 단방향 운전만 가능하나 인버터의 구성소자를 절감할 수 있고 일부 전동기는 고정자에서 자속의 반전이 없어 고효율 운전이 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 최근에 견인용 등을 위한 특수목적의 SRM이 다양한 자기적 구조를 가질 수 있는 특징을 이용하여 Double stator, Segmented stator or rotor, Axial-Flux 등의 다른 구조의 SRM도 개발되어 선택의 폭이 넓어져다. SRM 인버터의 경우 요구되는 가격과 성능에 따라 상수와 자기구조와 연계하여 여러 가지 조합이 가능하다. 따라서 SRM은 다양한 자기구조와 인버터를 가지고 있어 성능, 가격, 그리고 적용분야에 따라 선택의 폭이 큰 장점을 가지고 있다.

ACKNOWLEDGMENTS

This work was supported by Gyeongnam National University of Science and Technology Grant 2014

REFERENCES

[1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton, "Variable-speed switched reluctance motors," *Proc. IEE*, vol.127, Pt-B, no.4, pp.253-265, 1980.

[2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.

[3] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, and Stephen D. Umans, *Electric Machinery, 7th edition, Chapter 8*, McGraw-Hill Education, 2013.

[4] Hassan Moghbelli, Gayle E.Adams, and Richard G.Hoft, "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," *IEEE Trans. on IA*, vol.27, no.3, pp.531-538, 1991.

[5] Peter N.Materu, Ramu krishnan, "Estimation of Switched Reluctance Motor Losses," *IEEE Trans. on IA*, vol.28, no.3, pp.668-679, 1992.

[6] Qiang Yu, Berker Bilgin, and Ali Emadi, “Loss and Efficiency Analysis of Switched Reluctance Machines Using a New Calculation Method,” *IEEE Trans. on IE*, vol.62, no 5, pp.3072-3080, May 2015.

[7] Jawad Faiz and John W.Finch, "Aspects of Design Optimisation for Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. on EC*, vol.8, no.4, pp.704-713, 1993.

[8] C.bPollock and B. W. Williams, "Power convertor circuits for switched reluctance motors with the minimum number of switches," *Proc. IEE*, vol.137, Pt-B, no.6, pp.373-384, 1990.

[9] Slobodan Vukosavic and Vitor R.Stefanovic, "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation," *IEEE Trans. on IA*,

vol.27, no.6, pp.1034-1047, 1991.

[10] Ahmet M. Hava, Vladimir Blasco, and Thmas A. Lipo, "A Modified C-Dump Converter for Variable-Reluctance Machines," *IEEE Trans. on IA*, vol.28, no.5, pp.1017-1022, 1992.

[11] Krishnan R., Sung-Yeul Park, and Keunsoo Ha, "Theory and operation of a four-quadrant switched reluctance motor drive with a single controllable switch-the lowest cost four-quadrant brushless motor drive," *IEEE Trans. on IA*, vol.41, no.4, pp.1047 -1055, Sep./Oct. 2005.

[12] M. Anand, V. Arunkumar, K. Krishnamurthy, and B. Meenakshipriya, "Analysis and Modeling of Different Types of Converter In Switched Reluctance Motor for Reducing the Torque Ripple," *Proc. of ICIIECS'15*, pp.1-6, March 2015.

[13] Iqbal Husain, M. Ehsani, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control," *IEEE Trans. on PE*, vol.11, no.1, pp.91-98, 1996.

[14] Derrick E. Cameron, Jeffrey H.Lang and Stephen D.Umans, "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors," *IEEE Trans. on IA*, vol.28, no.6, pp.1250-1255, 1992.

[15] Chun Gan, Jianhua Wu, Mengjie Shen, Shiyou Yang, Yihua Hu, and Wenping Cao, "Investigation of Skewing Effects on the Vibration Reduction of Three-Phase Switched Reluctance Motors," *IEEE trans. on Magnetics*, vol.51, no.9, Sept. 2015.

[16] Hyong-Yeol Yang, Young-Cheol Lim, and Hyun-Chul Kim, "Acoustic Noise/Vibration Reduction of a Single-Phase SRM Using Skewed Stator and Rotor," *IEEE Trans. on IE*, vol.60, no.10, pp.4292-4300, October 2013.

[17] Chenjie Lin, and Babak Fahimi, "Prediction of Acoustic Noise in Switched Reluctance Motor Drives," *IEEE Trans. on EC*, vol.29, no.1, pp.250-258, March 2014.

[18] Chenjie Lin, and Babak Fahimi, "Prediction of Radial Vibration in Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. on EC*, vol.28, no.4, pp.1072-1081, Dec. 2013.

[19] Krishnan R., Staley, A.M., and Sitapati, K, "A novel single-phase switched rerluctance motor drive system", *Proc. of IECON'01*, vol.2, pp.1488-1493, 2001.

[20] Seok-Gyu Oh, Krishnan, R., "Two-Phase SRM with Flux-Reversal-Free Stator : Concept, Analysis, Design, and Experimental Verification," *IEEE Trans. on IA*, vol.43, no.5, pp.1247-1257, Sep./Oct. 2007.

[21] Seok-Gyu Oh and CheeWoo Lee, "A Study on Comparison of Two Phase SRMs," *KIIEE*, vol.25, no.1, pp.59-63, 2011.

[22] Seok-Gyu Oh and Jun-Kyung Bae, "A Study on the Comparison of SRMs with 3 Rotor Poles," *KIIEE*, vol.28, no.5, pp.92-97, May 2014.

[23] Seok-Gyu Oh and Gang-Yul Bae, "A Study on the Structure Characteristics of Two Phase 4/3 SRM," *KIIEE*, vol.28, no.5, pp.115-121, May 2014.

[24] S. Prabhu, M. Balaji, and V. Kamaraj, "Analysis of Two Phase Switched Reluctance Motor with Flux Reversal Free Stator," *Proc. of PEDS'15* Sydney, Australia, pp.320-325, June 2015.

[25] B. Bilgin, Ali Emadi, and M. Krishnamurthy, "Comprehensive Evaluation of the Dynamic Performance of a 6/10 SRM for Traction Application in PHEVs," *IEEE Trans. on IE,* vol.60, no.7, pp.2564-2575, July 2013.

[26] M. Cosovic, S. Smaka, I. Salihbegovic, and S. Masic, "Design Optimization of 8/14 Switched Reluctance Machinefor Electric Vehicle," *Proc. of ICEM'12*, pp.2654-2659, 2012.

[27] Cheewoo Lee, R. Krishinan, and N. S. Lobo, "Novel Two-Phase Switched Reluctance Machine Using Common Pole E-Core Structure : Concept, Analysis, and Experimental Verification," *IEEE Trans. on IA*, vol.45, no.2, pp.703-711, March/April 2009.

[28] Jin-Woo Ahn, "Characteristics Analysis of Short Flux-path 4/3 SRM," *JICEMS*, vol.2, no.1, pp.40-44, 2013.

[29] Hamed Eskandari and Mojtaba Mirsalim, "An Improved 9/12 Two-Phase E-Core Switched Reluctance Machine," *IEEE Trans. on EC*, vol.28, no.4, pp.951-958, Dec. 2013.

[30] Vandana R and G. Fernandes, "Design Methodology for High-Performance Segmented Rotor Switched Reluctance Motors," *IEEE Trans. on EC*, vol.30, no.1, pp.11-21, March 2015.

[31] James D. Widmer, Richard Martin, and Barrie C. Mecrow, "Optimization of an 80-kW Segmental Rotor Switched Reluctance Machine for Automotive Traction," *IEEE Trans. on IA*, vol.51, no 4, pp.2990-2999, July/Aug. 2015.

[32] Zhenyao Xu, Dong-Hee Lee, and jin-Woo Ahn,"Design of a Novel 6/5 Segmental Rotor Type Switched Reluctance Motor," *IEEE IAS Annual Meeting,* pp.1-7, 2014.

[33] Hongtao Zhang. Fengge Zhang, Dong-Hee Lee, and Jin-Woo Ahn, "Design and Performance Analysis of Segmental Rotor Type 12/8 Switched Reluctance Motor," *ITEC-AP 2014 IEEE Conference and Expo*, pp.1-6, Aug. 2014.

[34] Wei Wang, Mengying Luo, Eva Cosoroaba, Babak Fahimi, and Morgan Kiani, "Rotor Shape Investigation and Optimi-

zation of Double Stator Switched Reluctance Machine," *IEEE Trans. on Magnetics,* vol.51, no.3, Mar. 2015.

[35] Anas Labak and Narayan C. Kar, "Designing and Prototyping a Novel Five-Phase Pancake-Shaped Axial-Flux SRM for Electric Vehicle Application Through Dynamic FEA Incorporating Flux-Tube Modeling," *IEEE Trans. on IA*, vol.49, no.3, pp.1276-1288, May/June 2013.

[36] R. Madhavan, and Baylon G. Fernandes, "Performance Improvement in the Axial Flux- Segmented Rotor-Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. on EC*, vol.29, no.3, pp.641-651, Sept. 2014.

[37] Hirimu Arihara and Kan Akatsu, "Basic Properties of an Axial-Type Switched Reluctance Motor," *IEEE Trans. on IA*, vol.49, no.1, pp.59-65, Jan./Feb. 2013.

[38] R. Madhavan and Baylon G. Fernandes, "Axial Flux Segmented SRM with a Higher Number of Rotor Segments for Electric Vehicles," *IEEE Trans. on EC*, vol.28, no.1, pp.203-213, March. 2013.

오석규(Seok-Gyu Oh)

1991년 부산대학교 전기공학과(공학사)
1993년 부산대학교 전기공학과(공학석사)
1997년 부산대학교 전기공학과(공학박사)
1998년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수
※관심분야 : 전동기 설계, 전동기 구동, 전력전자