

해외기사 소개

# 저가형 고효율 가변속 스위치드 릴럭턴스 모터 드라이브의 개발

By Keunsoo Ha, Cheewoo Lee, Jaehyuck Kim, R. Krishnan, and Seok-Gyu Oh

본 글은 2007년 IEEE Transactions on Industry Applications에 게재된 Ramu Krishnan 교수님 외 4인 저자의 "Design and Development of Low-Cost and High-Efficiency Variable-Speed Drive System With Switched Reluctance Motor"를 번역하여 재편집한 내용입니다.

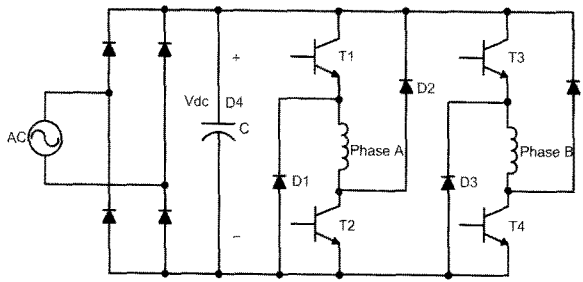
이 치 우

(경성대 전기공학과 전임강사)

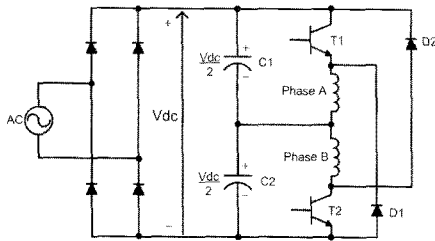
## 1. 서론

다양한 가정용 전동기에서의 가변 속도 제어기 개발은 가격이 싸고 효율이 높은 브리시리스 타입의 연구를 바탕으로 확산되고 있다. 또한 신뢰성, 안정성, 수명 및 소음 등의 이유로 산업체를 중심으로 브리시가 없는 모터의 개발이 왕성하게 이루어지고 있다. 스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor, SRM) 드라이브는 회전자에 자석이 없고 권선만 있는 간단한 모터 구조, 브리시리스 운전 등의 이유로 저가형 가변 속도 시스템에서 매력적인 후보로 인식되고 있다. 따라서 스위치드 릴럭턴스 모터는 많은 분야에서 요구되는 가격 경쟁력과 성능향상에 대해 많은 가능성을 가지고 있다. 저가형 모터 드라이브 시스템의 구현은 스위칭 소자의 개수를 줄임으로써 가능하며, 이런 관점에서 상당한 개의 스위치를 갖는 컨버터 구조가 가장 높은 가능성을 보인다. 다수의 논문에서 이와 관련된 방법을 제안하였고, 그 결과 스위칭 소자수를 줄이는 연구가 활발해졌다. 하지만 이러한 컨버터는 상대적으로 적은 스위칭 소자 및 간단한 구동 드라이브 때문에 성능 보다는 가격 경쟁력이 더욱 요구되는 시스템에 적합한 컨버터라고 볼 수 있다.

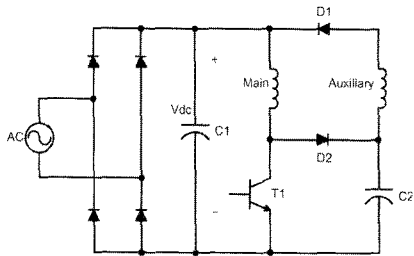
그림 1(a)의 비대칭 컨버터(asymmetric converter)는 한 상당 두 개의 스위칭 소자 및 두 개의 다이오드를 가지는 일반적인 구조의 컨버터로서 AC 모터 드라이브와 비슷한 구조이며, 각 스위칭 소자의 최소 정격 전압은 DC 링크 전압이 된다. 모터의 각 상은 독립적으로 제어가 되는 반면 단점은 상당 스위칭 소자가 두 개라는 것과 그에 따른 제어 및 구동 회로의 가격 상승이다. 따라서 높은 성능이 요구되는 시스템에 더욱 어울리는 컨버터이다. 그림 1(b)의 DC 전원 분리형 컨버터는 두 개의 분리된 커패시터와 상당한 개의 스위칭 소자를 가지며, 공급되는 직류 전압의 절반만 이용하며, 두 개의 DC 링크 커패시터의 전압 불평형이 단점으로 인식된다. 그림 1(c)에서는 한 개의 스위칭 소자만을 가지고 4 상한 운전이 가능한 컨버터 구조가 소개되었다. 이 구조는 게이트 소자, 로직 구동 전원, 방열판 등의 삭제로 가격적인 면에서 가장 유리한 장점을 가지고 있으나, 스위칭 소자는 주권선만 제어하고, 보조권선은 제어하지 못 하는 단점이 있다. 그림 1(d)의 N+1 컨버터는 스위칭 소자가 모터 상수보다 한 개 더 많은 구조로서 모든 상권선의 한 쪽이 공통 스위치와 다이오드 중간점에 연결되어 있다. 이는 비교적 넓은 영역의 운전, 즉 정상적인 통전, 환류(free



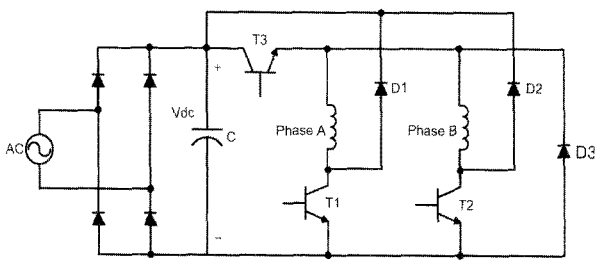
(a) 비대칭 컨버터



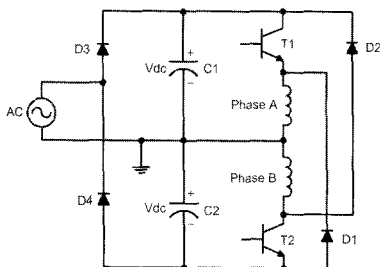
(b) DC 전원 분리형 컨버터



(c) 한 개의 능동 스위치를 갖는 컨버터



(d) N+1 컨버터



(e) AC 전원 분리형 컨버터

그림 1 2相 스위치드 릴럭턴스 모터 구동용 컨버터

wheeling) 및 상전환(commutation) 모드를 모두 가능케 하는 최소의 스위칭 소자를 사용하고 있다. 비대칭 컨버터 보다는 적은 스위칭 소자를 가진다. 그러나 N+1 컨버터는 각 상의 독립적 제어가 불가능한 것이 단점이며, 그로 인하여 상전환(commutation) 시간이 지연된다. 이러한 컨버터 구조의 비교를 통하여 저가형 고효율 드라이브를 구현하기 위해서 본 논문에서는 그림 1(e)와 같이 AC 전원 분리형(Split-AC) 컨버터를 제안하고자 한다. AC 전원을 분리하는 반파 정류기는 매 AC 반주기마다 하나의 커패시터를 충전하며, 그 커패시터는 토크를 발생하는 상의 환류와 회생(regeneration) 시간 동안 방출되는 에너지를 저장한다. 또한, 이러한 특징은 빠른 상전환을 가능하게 한다. 제안된 컨버터의 성능은 효율 예측 및 측정을 통하여 검증되며, 이를 위하여 자가 기동이 가능한 2상 스위치드 릴럭턴스 모터가 이용된다.

## 2. 2相 스위치드 릴럭턴스 모터

그림 2는 본 논문에서 검토 대상으로 하는 2상 스위치드 릴럭턴스 모터로서 상권선이 여자될 경우 발생하는 자속의 흐름을 보여준다. 제시된 2상 모터의 경우 하나의 큰 고정자 자극과 두 개의 작은 고정자 자극들이 함께 한 상으로 구성된다. 회전자의 자극표면은 원하는 토크 형상을 얻기 위해 일정하지 않게 설계되어 있으며 그로 인해 회전자 자극과 고정자 자극으로 형성되는 공극은 비대칭이다. 이때, 회전자는 공극의 인덕턴스가 커지는 방향으로 토크를 발생시킨다.

## 3. 컨버터 비교

적합한 컨버터의 선정과 설계는 스위치드 릴럭턴스 모터

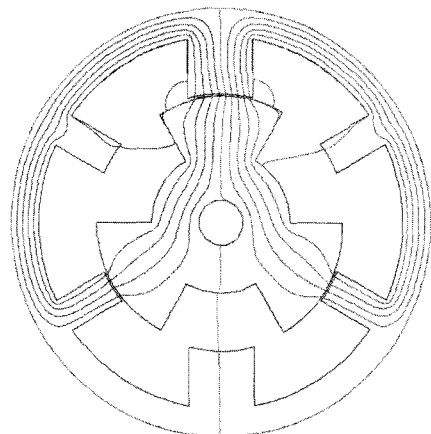


그림 2 제안된 2相 스위치드 릴럭턴스 모터

표 1 컨버터 손실 비교

Type of Losses	Asymmetric		N+1	Split DC	Split AC	Single controllable switch
	Hard	Soft				
Convert VA Rating	4VI	4VI	3VI	4VI	4VI	2VI
IGBT Switching	4	2	4	4	4	2
IGBT Conduction	5.3	7.95	5.3	5.3	2.65	2.65
Diode Conduction	3.96	1.65	3.96	3.96	1.98	3.96
Total Converter	13.26	11.60	13.26	13.26	8.63	8.61

표 2 컨버터의 전반적인 특성 비교

Features	Asymmetric	N+1	Split DC	Split AC	Single controllable switch
Phase Independence	Yes	No	Partial	Partial	No
Commutation Time	Fast	Slow	Slow	Fast	Slow
Free Wheeling	Yes	Yes	No	No	Yes
Performance	Very Good	Fair	Fair	Good	Low
Number of Rectifier Diodes	4	4	4	2	4
Number of Switches	4	3	2	2	1
Number of Diodes	4	3	2	2	2
Number of Floating Power	5	2	2	2	1
Number of DC Capacitors	1	1	2	2	2
Cost	High	Medium	Low	Low	Lowest
Converter Efficiency	Medium	Low	Low	High	High

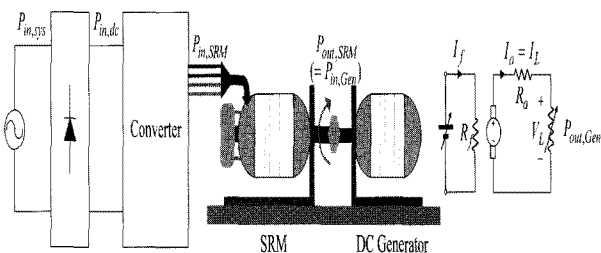


그림 3 효율 측정 시스템

드라이브의 연구 분야 중 하나로서 드라이브의 성능과 가격 관점에서 컨버터의 구조는 중요한 역할을 한다. 컨버터의 구조에 대한 분류는 여러 가지 방법이 있지만 가장 일반적인 경우는 스위칭 소자의 수에 의한 분류이다. 스위칭 소자의 가격 상승과 그로 인한 회로 구성의 복잡성 때문에 스위칭 소자를 감소시키기 위한 연구가 왕성하게 수행되고 있다. 본 연구에서는 효율, 가격, 성능 등에 대해 정성적이거나 정량적으로 컨버터를 비교 평가함으로써 2상 스위치드 릴럭턴스

모터에 가장 적합한 컨버터 구조를 선정코자 한다. 우선, 각 컨버터의 정격 VA (volt- ampere)와 전력 손실에 대해 비교하여 컨버터의 효율을 상대적으로 평가한다. 컨버터의 전력 손실은 스위칭 손실과 통전 손실로 구분되며, 스위칭 손실은 최대 허용 전압과 전류에 의해 예측될 수 있는 반면 통전 손실은 제어 형태, 스위칭 변수, 토크-속도 특성이 동일하다고 가정된 후에 스위칭 소자에 흐르는 평균 전류와 전압 강하 값에 의해 계산된다.

다양한 컨버터의 비교를 위해 표준화된 IGBT의 전력 손실 값을 사용하며, 이때 손실은 1 p.u(per-unit)로 환산된다. 2상 스위치드 릴럭턴스 모터에서 하드 쇼핑을 하는 비대칭 컨버터의 경우 4개의 IGBT를 사용하므로, 전체 IGBT의 스위칭 손실은 4 p.u 이다. 이러한 계산은 다른 컨버터에서도 동일하게 적용된다. 그림 (d)의 N+1 컨버터의 경우, 스위치 T3이 매번 운전할 때 마다 반복적으로 스위칭을 하므로 2배의 스위칭 손실을 나타낸다. DC 전원 분리 및 AC 전원 분리 컨버터의 경우, 비대칭 컨버터에 비하여 절반의 스위칭 소자를 갖는다. 따라서 스위칭에 인가되는 전압 및 전류는 각각  $(V_{dc}, 2I)$ ,  $(2V_{dc}, I)$ 가 된다. 그 결과 비대칭 컨버터와 같은 정격 VA(4p.u)를 갖는다. 그림 1(c)의 한 개의 능동 스위치를 갖는 컨버터는 2배의 인가 전류를 필요로 하므로 2 p.u의 정격 VA를 나타낸다.

표준화된 IGBT 및 다이오드의 통전 손실은 측정된 평균 전류 및 스위치 온 동작시 발생하는 전압 강하를 통하여 예측할 수 있고, 이는 IGBT 스위칭 손실 (1p.u)과 비교하면 각각 1.33 p.u와 0.99 p.u으로 나타낼 수 있다. 따라서 하드 쇼핑 방식의 비대칭 컨버터의 경우 전체 IGBT 및 다이오드의 통전 손실에서 각각 5.3 p.u와 3.96 p.u을 나타낸다. 소프트 쇼핑 방식의 경우 IGBT 스위칭 손실은 줄어들고, IGBT 통전 손실은 7.95 p.u로 증가된다.

위에서 설명된 예측 방법을 통해 구해진 컨버터들의 손실이 표 1에서 비교된다. AC 전원 분리 컨버터는 다른 컨버터보다 적은 스위칭 소자 및 정격 VA를 가지므로 가장 적은 전력 손실을 보여줄 수 있다.

컨버터 토폴로지를 적합하게 선정하는 또 다른 인자는 스위칭 소자수, 절연된 게이트 회로, 수동 소자, 센서와 제어 회로 등으로 구성되는 전체 드라이브의 가격이며, 표 2에서는 이런 관점에서 컨버터들을 비교하고 있다.

스위칭 소자 외에 전체 드라이브의 가격을 결정하는 인자는 DC 커패시터이다. 표 2와 그림 1에서 알 수 있듯 전원 분리형 컨버터들은 두 개의 커패시터를 사용하며, 한 개의 능동 스위치를 갖는 컨버터도 두 개의 커패시터를 사용한다. 따라서 전원 분리형 컨버터의 경우 DC 커패시터의 추가로 인해 드라이브 가격이 상승하게 되며, 전류 리플의 증가는 커패시터의 용량을 증가시키므로 이 또한 드라이브의 가격

을 상승시키는 요인이 된다.

하지만 스위칭 소자 감소와 그에 따른 게이트 회로의 감소는 전원 분리형 컨버터의 가격을 비대칭 컨버터에 비하여 감소시키는 역할을 한다. 전류 리플을 줄이는 적절한 알고리즘을 사용할 경우 커패시터 용량은 줄어들 수 있다. 한편 AC 전원 분리형 컨버터는 다른 컨버터에 비해 상대적으로 정류 다이오드의 수가 적어서 DC 전원 분리형 컨버터보다 가격이 떨어진다.

한 개의 능동 스위치를 갖는 컨버터가 스위칭 소자의 수적인 면에서는 가장 저렴한 컨버터이지만, 상대적으로 낮은 효율과 성능으로 본 연구에서는 제외된다. AC 전원 분리형 컨버터의 경우 비대칭 컨버터와 같은 정격 전력 용량을 갖지만 적은 수의 스위칭 소자를 사용하며, 전체 컨버터 손실은 가장 낮다. 이는 AC 전원 분리형 컨버터가 가장 저렴하고 높은 효율을 갖도록 하는 장점이다. 비대칭 컨버터의 경우 상대적으로 높은 드라이브 가격으로 인해 가격 경쟁력은 낮지만 높은 성능과 신뢰성의 관점에서 우수하므로 본 연구에서 제안하고자 하는 AC 전원 분리형 컨버터의 비교대상으로 적합하다.

#### 4. AC 전원 분리형 컨버터의 성능 예측과 실측

AC 전원 분리형 컨버터 시스템은 16비트 DSP 제어기(TMS320LF2808)를 통하여 구동된다. 트랜스듀서(LA25-NP)를 이용하여 상권선의 전류를 피드백 하였다. 제안된 AC 전원 분리형 컨버터와 비대칭 컨버터와의 공정비 비교를 위하여 동일한 선행각(advance)과 도통각(dwell)을 사용하였다. 그림 3은 효율을 실측하기 위한 전체 시스템으로서 DC 발전기를 부하로 가지며 2상 스위치드 릴럭턴스 모터(2.2hp, 3000r/min)를 같은 조건에서 구동하면서 두 컨버터의 성능이 비교되었다. 그림 4는 AC 전원 분리형 컨버터의 운전시 오실로스코프를 이용하여 캡처한 상권선 전압과 전류의 파형이며, 전압과 전류의 순시치를 이용하여 전력을 실측하였다.

표 3에서는 두 컨버터 시스템의 정류기에서 나타나는 효율을 예측과 실측으로 비교한다. 정류 다이오드의 정방향 전압 강하는 데이터 시트에 준하여 1V로 가정하며, DC 링크의 평균 전류로 전력 손실을 예상한다. 비대칭 컨버터는 일반적으로 전파 정류기를 사용하지만, AC 전원 분리형 컨버터는 반파 정류기를 이용하여 DC 링크 전원을 공급한다. 제안된 AC 전원 분리형 컨버터의 전압을 정류하기 위하여 사용되는 다이오드의 수는 비대칭 컨버터의 절반이지만, 비대칭 컨버터의 정류시 보다 각 다이오드에 흐르는 전류는 DC 링크 전류의 절반이기 때문에 표에서 알 수 있듯 비대칭 컨버터의 정류기 손실은 AC 전원 분리형 컨버터와 거의 동일하다.

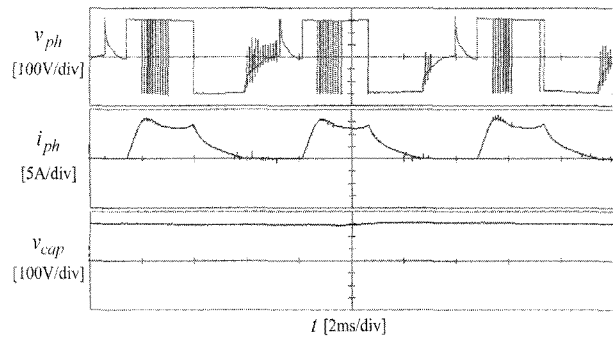


그림 4 AC 전원 분리형 컨버터의 실측 파형

표 3 정류기의 효율 비교

Torque [Nm]	Estimations [%]			Measurements [%]		
	Split AC	Asymmetric	Difference	Split AC	Asymmetric	Difference
1	99.69	99.70	-0.01	98.43	99.30	-0.87
2	99.70	99.68	0.02	99.18	99.49	-0.31
3	99.68	99.67	0.01	98.03	99.50	-1.47
4.5	99.64	99.65	-0.01	98.63	98.39	0.24

표 4 컨버터의 효율 비교

Torque [Nm]	Estimations [%]			Measurements [%]		
	Split AC	Asymmetric	Difference	Split AC	Asymmetric	Difference
1	96.66	95.30	1.30	98.01	95.46	2.55
2	97.59	96.43	1.16	96.54	98.75	-2.21
3	97.90	97.01	0.89	96.23	97.20	-0.97
4.5	97.92	97.22	0.70	97.19	96.86	0.33

표 4에서는 두 시스템의 컨버터에서 나타나는 효율을 예측과 실측으로 비교한다. 스위칭의 각 영역에서의 전력 손실은 다이오드 및 스위치의 턴온 전압 강하가 부하에 상관없이 동일하다고 가정한 후에 데이터 시트에서 제공되는 스위칭 관련 변수, 측정되는 최대 전류, 평균 전류를 근거로 해서 예측할 수 있다. 전체 스위칭 소자의 개수는 다르지만 AC 전원 분리형 컨버터의 스위칭 소자에 걸리는 전압은 2배이므로 두 컨버터의 스위칭 손실은 거의 같다. 표에서 알 수 있는 것처럼 AC 전원 분리형 컨버터의 스위칭 소자의 도통 손실 및 다이오드 손실은 비대칭 컨버터의 절반이므로 전체 컨버터 손실은 비대칭 컨버터에 비하여 감소하게 된다.

모터에서 발생하는 기계적 출력은 토크와 회전자 각속도의 곱으로 예측할 수 있다. 표 5에서 알 수 있듯 AC 전원 분리형 컨버터를 이용할 때 모터 효율이 낮은 부하에서는 2.46%, 높은 부하에서는 1.34% 낮게 나타나며, 특히 높은 부하에서 그 차이가 적다. 비대칭 컨버터의 소프트 초핑 운전 시 환류(free wheeling) 모드에서 영(zero) 전위가 생기

표 5 모터의 효율 비교

Torque [Nm]	Estimations [%]			Measurements [%]		
	Split AC	Asymmetric	Difference	Split AC	Asymmetric	Difference
1	63.99	66.09	-2.10	64.55	67.01	-2.46
2	66.10	73.70	-7.60	69.14	71.65	-2.51
3	70.63	75.32	-4.69	74.76	76.18	-1.42
4.5	79.57	79.64	-0.07	81.11	82.45	-1.34

표 6 모터 드라이브 시스템의 효율 비교

Torque [Nm]	Estimations [%]			Measurements [%]		
	Split AC	Asymmetric	Difference	Split AC	Asymmetric	Difference
1	61.66	62.89	-1.23	62.27	63.52	-1.25
2	64.31	70.96	-6.65	66.21	70.39	-4.18
3	68.92	72.95	-4.06	70.52	73.67	-3.15
4.5	77.63	77.29	0.34	77.75	78.58	-0.83

므로 이때 발생하는 적은 리플 전류는 철손을 줄이는 효과를 가져온다.

표 6에서는 두 시스템의 전체 효율을 예측과 실측으로 비교한다. 전체 시스템 효율은 앞에서 제시된 정류기, 컨버터, 모터의 효율을 모두 포함하여 판단된다. 두 시스템간의 차이는 낮은 부하에서는 1.3%, 중간 부하에서는 약 3-4%, 높은 부하에서는 편차가 감소되어 약 0.8%의 차이를 보인다. 따라서 AC 전원 분리형 컨버터는 비록 모터의 효율은 비대칭 컨버터 시스템보다 낮지만 전체 시스템 효율 관점에서는 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 상대적으로 적은 스위칭 및 다이오드 손실로 정류기 및 컨버터의 효율 향상에 기인한다고 할 수 있다.

### 5. 결론

본 기사에서는 저가형 고효율 가변속 모터 드라이브에 대해서 알아보았다. 2상 스위치드 릴럭턴스 모터를 구동하기 위한 드라이브로서 AC 전원 분리형 컨버터 시스템을 제안하였다. AC 전원 분리형 컨버터를 다른 컨버터와 비교하여 분석하고 평가함으로써 가격과 성능의 우수성이 이론적으로 검증되었으며, 또한 이 AC 전원 분리형 컨버터는 실험적으로 비대칭 컨버터와 다시 비교됨으로써 그 장점이 재차 검증되었다. AC 전원 분리형 컨버터 시스템에서 모터 효율은 비대칭 컨버터 시스템보다 상대적으로 낮지만 정류기 및 컨버터 성능의 향상으로 인해 전체 시스템 효율은 대등함을 확인

하였다. 전체 및 서브 시스템의 효율이 예측되고 실측으로 측정되어 비교되었고, 그 결과 예측 값과의 상관관계를 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 AC 전원 분리형 컨버터 시스템은 전체 부하 영역에서 비대칭 컨버터 시스템에 상응하는 효율과 드라이브 성능을 가지므로 저가형 고효율 가변속 모터 드라이브를 요구하는 시스템에 적합함을 이론과 실험으로 검증하였다.

### 참고 문헌

- [1] Keunsoo Ha, Cheewoo Lee, Jaehyuck Kim, R. Krishnan, and Seok-Gyu Oh "Design and Development of Low-Cost and High-Efficiency Variable-Speed Drive System with Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 43, No. 3. pp. 703-713, May/June 2007.
- [2] R. Krishnan, S. Y. Park, and K. S. Ha, "Theory and operation of a four-quadrant switched reluctance motor drive with a single controllable switch-The lowest cost brushless motor drive", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 41, No. 4. pp. 1047-1055, July/Aug. 2005.
- [3] Slobodan Vukosavic and Victor R. Stefanovic, "SRM Inverter Topologies: A Comparative Evaluation", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 27, No. 6, pp. 1034-1047, Nov./Dec. 1991.

### 〈 필 자 소 개 〉



#### 이치우(李致雨)

1972년 10월 14일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2010년 Virginia Tech 전기공학과 대학원 졸업(공학박). 1998년~2003년 LG전자 Home Appliance 사업본부 선임연구원. 2010년 1월~2010년 5월 Ramu Inc (USA) senior engineer, 2010년 7월~2011년 2월 삼성전기 중앙연구소 책임연구원. 2011년 3월~현재 경성대 전기공학과 전임강사.