

특집 : 가전에서의 모터 및 제어기술 동향

가전 모터의 고효율 기술

김 병 택

(군산대 전기공학과 부교수)

인간이 일상생활에서 매일 사용하는 가전제품에는 쉽게 보이지는 않지만 제품의 특성에 따라 다양한 모터가 적용되어 있다. 가전 모터는 가전의 역사와 같이하는 만큼 오랜 세월 동안 진화를 거치면서 타 분야에 비해 실용적 측면에서 앞서 있는 것이 사실이다. 이 중 근래 대표적인 가전제품인 에어컨과 냉장고, 세탁기와 청소기에 사용되는 모터에 대해 현재까지의 기술 동향을 소개하고자 한다.

1. 서론

인간이 전기에너지를 이용하기 시작한 이후 매우 오랜 세월 동안 가정생활의 편의를 위해 전기제품을 이용해 왔으며 현대에는 생활의 필수품이 되었다. 가전기기는 조명, 정보, 음향·영상기기 등과 같이 동력장치를 요구하지 않는 기기와 반드시 동력장치가 필요한 기기로 나눌 수 있다. 동력장치, 즉 모터를 필요로 하는 제품의 대표적인 예가 세탁기, 냉장고, 에어컨, 청소기 등으로서 전통적으로 백색 가전제품으로 일컬어져왔다.

가전기기는 많은 일반 사용자의 구매욕구와 구매력이 제품의 판매량을 결정하므로 제품의 전기적 효율 뿐 아니라 기능과 가격에 개발의 초점이 더욱 맞추어져왔다고 볼 수 있다. 그러나 최근 대기 오염, 지구 온난화, 화석연료 부족 등과 같은 이슈가 대두됨에 따라 모든 전기 제품에 대한 고효율화 요구가 강력해지고 있다. 심지어 일정 수준의 효율을 갖추지 못한 제품에 대한 생산, 수입, 판매를 금지하는 정책을 범세계적으로 도입하는 추세이다. 이에 따라 전통적 백색가전기기의 기술은 최신 스마트 기술의 결합과 더불어 고효율 기기 개발을 목표로 해야 하는 상황을 맞고 있으며, 이를 위한 일차적 전략은 고효율 모터의 개발이 된다.

본 논문에서는 먼저 대표적인 가전제품의 부하특성을 설명하고 부하요구에 적합한 대표적 모터와 그 특성 및 고효율화 기술 동향을 소개한다. 자세한 모터에 대한 설명을 위해 적용 제품의 특성에 따라 정속형과 가변속형의 두 가지로 구분하여 기술하였다. 정속형 모터의 경우 유도전동기 등의 상용전원 기반의 구동 모터에 대한 동작원리와 고효율화를 위한 설계 기술 등을 설명하였다. 가변속형 모터에서는 고효율과 고토크 및 고속 운전특성 등을 요구하는 제품에 대해 영구자석 BLDC/AC 모터를 이용한 적용사례와 설계 기술 등을 서술하였다.

2. 가전기기의 부하특성

모터를 사용하는 목적은 부하를 운전하는 것이므로 적절한 모터를 적용하기 위해서는 부하의 특성 즉 속도 대 토크특성

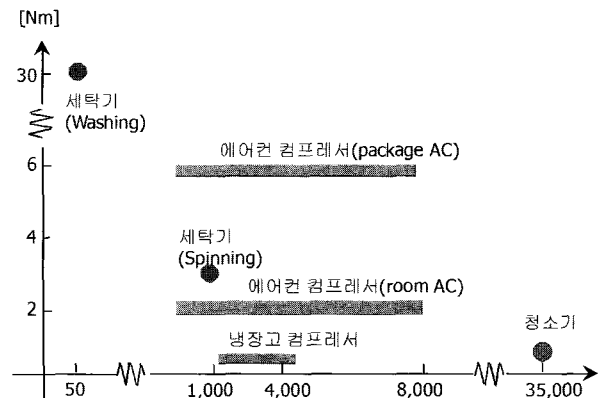


그림 1 대표적인 가전기기와 운전속도

을 정확히 규명하는 것이 우선되어야한다. 본 논문에서 다루고자하는 대표적 가전기기인 세탁기, 에어컨, 냉장고 및 청소기의 부하특성을 그림 1에 나타내었다. 그림에 나타난 바와 같이 거의 대부분의 기기는 가변속 운전을 요구하며 각각의 제품에 따른 특징이 있음을 알 수 있다. 세탁기의 경우, 세탁과 탈수 운전에 따라 각각 45rpm/30Nm, 1000rpm/3Nm의 운전특성을 요구하며, 요구기능에 따라 속도와 토크 모두 격차가 매우 크다. 에어컨과 냉장고는 둘 다 컴프레서 구동용이며, 요구 토크는 속도에 상관없이 거의 일정하다. 단 에어컨의 경우 가변속 범위가 상당히 넓은 반면, 냉장고는 가변속 범위가 그리 크지 않음을 알 수 있다. 그리고 청소기의 경우 거의 정속운전으로 토크는 매우 작지만 운전속도는 가장 높은 35000rpm 근처가 된다.

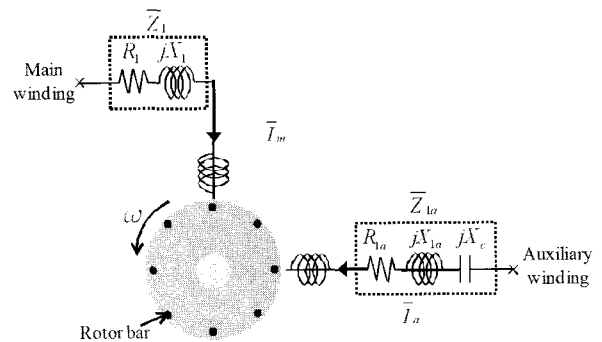
3. 정속 모터

정속형 모터는 가정용 교류전원을 사용하여 운전되고 속도가 거의 일정한 모터를 의미한다. 따라서 운전 속도범위가 작은 시스템에 적용가능하며, 그림 1에 나타난 바와 같이 냉장고 컴프레서가 가장 적합한 대상임을 알 수 있다. 이는 컴프레서 부하의 크기가 거의 일정하고, 상용주파수로 운전 가능한 속도영역을 가지고 있을 뿐 아니라 가변속 운전 없이 온오프제어를 통해 냉장고의 온도를 적절히 유지할 수 있기 때문이다.

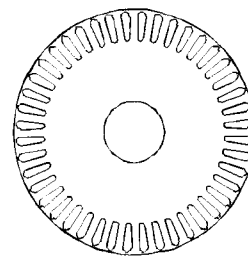
3.1 단상 유도모터

가전기기용 전동기 중 가장 오랜 역사를 가진 전동기는 단상유도전동기라고 할 수 있다. 이는 다른 부가적 장치 없이 가정용 교류전원만을 사용하며, 안정된 운전성능을 갖기 때문이다. 일반적으로 단상유도전동기의 권선은 공간적으로 직교하는 두 개의 권선(주권선과 보조권선)을 병렬로 단상전원에 걸선함으로써 전류의 위상과 기동토크를 유도한다.^[1] 이때 보조권선의 구성에 따라 여러 종류로 나뉘지만 냉장고 컴프레서 구동용 전동기는 콘덴서 운전방식을 주로 사용하며 등가회로를 그림 2에 나타내었다.

잘 알려져 있는 바와 같이 유도전동기는 영구자석 동기전동기에 비해 효율이 낮다. 이는 유도전동기의 구조가 계자와 전기자의 구분되어 있지 않기 때문에 고정자에 계자전류가 포함되어 있으며, 회전자로 전달된 전력의 전부가 기계적 동력으로 변환되지 못하고 일부분의 전력이 필연적으로 회전자의 동손으로 사라지기 때문이다. 추가적으로 단상유도전동기의 특성상 삼상기와 달리 공극에서 타원자계가 생성된다. 이로 인해 삼상전동기에 비해 기동, 최대토크, 효율의 상관관계에서 매우 까다로운 trade-off문제를 발생시키며 전동기의 해석과 설계를 매우 어렵게 한다. 반면 단상유도전동기에서의



(a) 구동회로



(b) 회전자 형상

그림 2 단상 유도전동기

콘덴서 활용은 역률을 개선하는 효과가 있으므로 삼상유도기에 비해 우수한 역률을 갖는다. 이 같은 특성의 복잡한 관계에도 불구하고 오랜 세월동안 해석, 설계, 제작 기술이 끊임 없는 진보를 거듭하였으며 최근 냉장고 컴프레서 구동용 단상유도전동기의 효율은 약 87%이상이며, 역률 또한 90%이상으로 비교적 우수한 성능을 확보한 상태이다.

3.2 고효율 단상 정속형 모터

단상 유도전동기의 효율이 80% 후반으로 포화된 상황에 추가적 효율개선을 위해 정속 운전 기반의 고효율 전동기로서 가장 높은 관심을 끄는 전동기는 직입 구동형 영구자석(line start permanent magnet motor, LSPM) 동기전동기이다. 이는 기존 유도전동기에 영구자석을 삽입한 형태를 갖는 구조로서 그림 3(a)에 나타내었다.^[2] LSPM 동기 전동기는 유도기 모드로 기동하는 장점과 동시에 동기속도로 진입 후에는 영구자석 동기전동기로 운전되어 90%이상의 효율과 100%에 가까운 역률특성을 보유한다. 그러나 그림 3(b)에 나타난 바와 같이 비동기속도(기동 구간)에서 영구자석에 의한 제동토크가 발생하고 동기기 운전구간에서 불평형 자계로 인한 최대토크 감소가 나타난다. 이는 제품에서 단상 유도전동기를 대체시키는데 걸림돌이 되고 있어 이를 개선하고자하는 연구가 다양하게 진행되고 있다.^{[3][4]}

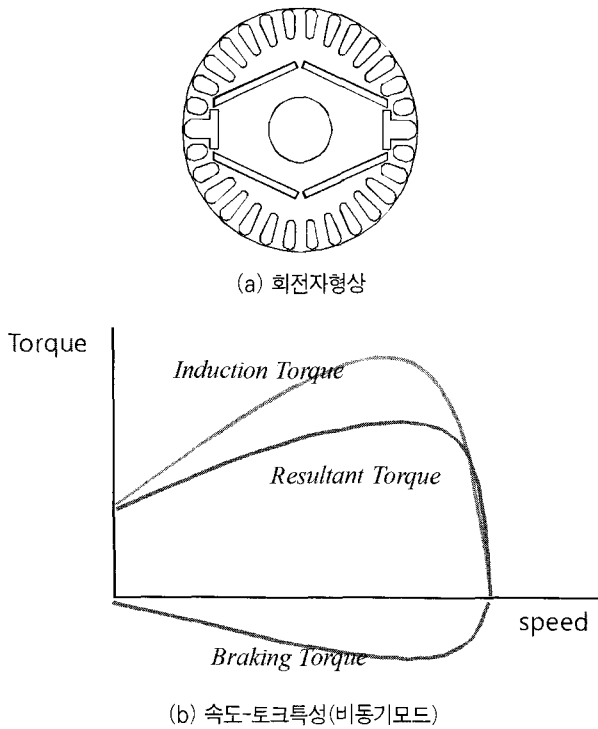


그림 3 직입 구동형 영구자석 (line start permanent magnet motor, LSPM) 동기전동기

4. 가변속 모터

벡터제어를 이용한 약계자운전기법이 제시되고, 이를 가능하게 하는 고성능 전력변환 장치가 개발됨에 따라 교류모터를 매우 넓은 영역까지 가변속운전 할 수 있게 되었다. 벡터 제어기술은 이론적으로 유도모터와 동기모터 모두 적용이 가능하지만, 유도모터의 경우 전기자와 계자의 구분이 없기 때문에 동기모터에 비해 제어기술이 상대적으로 복잡하다. 또한 소형화와 효율성능 측면에서 동기모터, 특히 영구자석 동기모터가 유리한 까닭에 현재까지 가전업체는 영구자석 동기모터의 저가격화를 통한 적용에 좀 더 치중해왔다. 주요 적용 제품으로 에어컨과 같이 정 토크, 대 전력의 연속운전을 요구하는 경우와 세탁기와 같이 저속-고 토크와 고속-저 토크 성능을 동시에 요구하는 경우가 있으며, 이에 따라 모터의 형태와 성능, 사용되는 자석 등이 다르게 된다.

4.1 영구자석 동기전동기

영구자석 동기전동기는 시스템의 요구 성능에 따라 다양한 설계를 요구하며, 구조와 형태가 달라진다. 그러나 대부분의 가변속 시스템은 그림 4(a)의 구성도와 같이 운전되며, 전동기의 등가회로에 대한 페이저도는 그림 4(b)와 같다. 이로부터

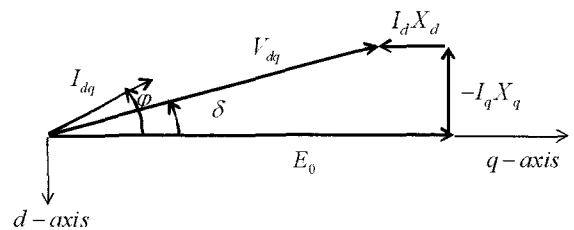
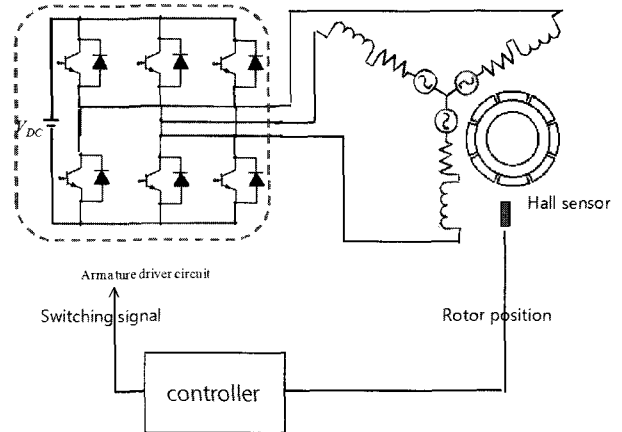


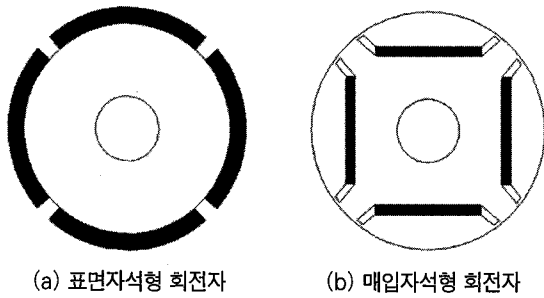
그림 4 영구자석 동기전동기의 구동회로 및 페이저도

터 (1)의 출력방정식을 얻을 수 있으며, 이를 이용하여 기술 개발 동향을 설명할 수 있다. 여기서 V_{ph} 는 상전압, E_{ph} 는 영구자석에 의해 발생하는 고정자의 유도전압, X_d 와 X_q 는 각각 d, q 축 리액턴스를 의미한다. 잘 알려진 바와 같이 (1)에서 우변 첫 항은 영구자석에 의한 출력 항이며, 둘째 항은 돌극비, 즉 리액턴스 차에 의한 출력 항이다.

$$P_o = \frac{3E_{ph} V_{ph} \sin \delta}{X_d} + \frac{3V_{ph}^2}{2} \left(\frac{X_d - X_q}{X_d X_q} \right) \sin 2\delta \quad (1)$$

4.1.1 고효율 BLAC/DC 모터

에어컨과 냉장고의 컴프레서용 전동기는 대 전력 혹은 장기간 운전되는 시스템의 특성상 높은 효율과 가전기기의 특성상 작은 체적을 원하는 설계를 필요로 한다. 사용되는 영구자석은 초기에 페라이트 자석이였으며, 회전자의 형태는 그림 5(a)와 같은 표면 자석형이 주로 설계되었다. 이는 페라이트 자석의 잔류자속밀도가 낮아서 공극자속밀도를 확보하기 위해서는 자석의 체적이 극대화되어야 하기 때문이다. 또한 큰 두께의 자석은 (1)의 리액턴스를 작게 하는 효과가 발생하므



(a) 표면자석형 회전자 (b) 매입자석형 회전자

그림 5 영구자석 동기전동기의 회전자 형태

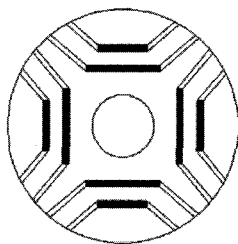


그림 6 영구자석-릴럭턴스 결합형 회전자

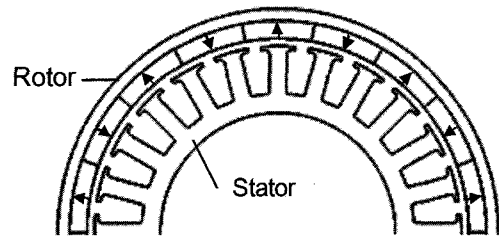


그림 7 외전형 영구자석 동기전동기

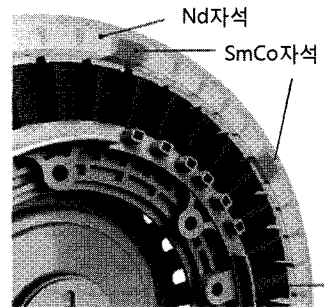


그림 8 가변자속형 영구자석 동기전동기

로 비교적 우수한 출력특성을 확보할 수 있다. 반면 회전자표면에 자석이 위치하므로 (1)의 릴럭턴스 출력 항을 이용할 수 없는 조건이다.⁽⁶⁾⁻⁽⁷⁾

이후 일본과 미국에서 독점하던 N_d 계열 영구자석과 관련된 특허권이 만료되면서 많은 양의 자석이 중국에서 제조되기 시작하였다. 이로부터 희토류 자석의 사용이 보편화되었으며, 높은 가격에도 불구하고 영구자석 동기전동기의 형태를 표면 자석구조로부터 그림 5(b)와 같이 매입 자석구조로 바꾸는데 큰 기여를 하였다. 즉 작은 양의 영구자석을 회전자 코어에 삽입해도 높은 공극자속밀도를 확보할 수 있으며, 이때 삽입된 자석에 의해 돌극 비가 발생하며 릴럭턴스 출력 항에 의해 출력밀도가 향상되는 장점을 갖게 한다.⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾

이후 영구자석 매입형 동기전회전자의 형상은 최소의 자석량으로 최대의 돌극비 구현하며, 또한 공극자속분포를 정형적으로 분포시키기 위해 그림 6과 같이 다층의 자속장벽구조를 갖는 회전자가 주로 최근까지 연구되고 있다.⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾

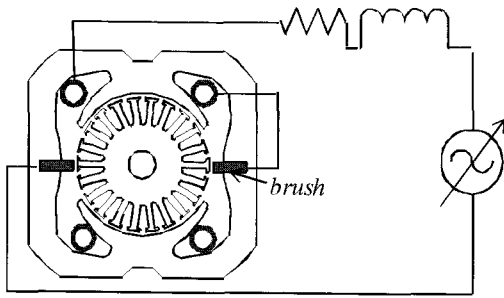
4.1.2 고토크 BLAC 모터

2장에서 언급한 바와 같이 세탁기는 운전 모드에 따라 요구하는 속도와 토크의 차이가 가장 큰 기기이다. 때문에 널리 이용된 전동기는 고속운전이 가능한 유니버설에 벨트와 풀리 등의 변속장치를 추가적으로 이용하여 사용했었다. 이후 사용자의 편의성과 물 소비량 절약에 개발 초점을 맞춰 부가장치를 제거하고 BLDC전동기만으로 운전하는 직접구

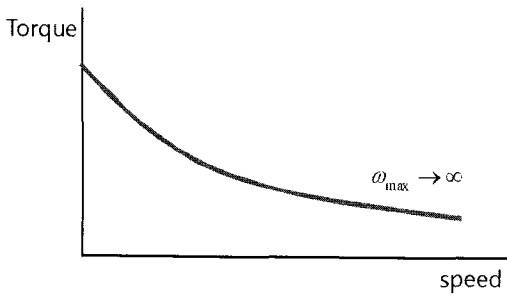
동방식이 도입된 뒤 이후 기술적 변화가 크게 진행되었다. 세탁기에 사용되는 모터의 전형적인 형상을 그림 7에 나타내었으며, 그림과 같이 일반적으로 다극 외전형, 집중권의 구조를 갖는다. 이는 세탁기가 요구하는 고토크 특성을 만족하기 위해 공극 반경이 커야하며, 극수가 많을수록 회전자의 요크두께가 얇아지게 되는 특성을 적극 활용한 결과이다. 또한 다극구조에서 분포권을 적용하는 경우, 필요한 고정자 슬롯수를 현실적으로 구현하기 어렵기 때문에 집중권 구조를 취하게 된다. 사용되는 자석은 국내에서는 페라이트자석이 주로 이용된다.

이 같은 구조의 세탁기용 전동기에 대해 현재까지의 취약점은 저속에서의 고토크 운전을 만족하는 경우, 고속운전 시 약 계자 전류를 증대시켜 효율을 크게 악화시키는데, 이는 세탁기의 대용량화 및 고효율 전략에도 걸림돌이 된다. 이에 대한 대안으로 근래 메모리모터가 제시된 이후 최근 일본의 도시바사에서 실제로 출시한 가변자속 모터를 그림 8에 나타내었다.⁽¹⁴⁾

이 구조는 모터의 자석특성이 영구적으로 불변하기 원하던 기존 영구자석 전동기의 페라다임을 바꾸는 것으로 운전모드에 따라 자석의 일부(SmCo)를 탈자 혹은 착자할 수 있도록 한다. 따라서 기존 계자 권선형 동기전동기와 마찬가지로 자속량을 가변시켜 최대 토크, 운전속도 및 효율특성을 제어할 수 있도록 하였다. 이를 위해서는 해석과 설계, 자석재질의 선택 등과 같이 많은 복잡한 상황이 발생하지만, 자동차 구동



(a) 구동회로



(b) 속도-토크특성

그림 9 유니버설 전동기

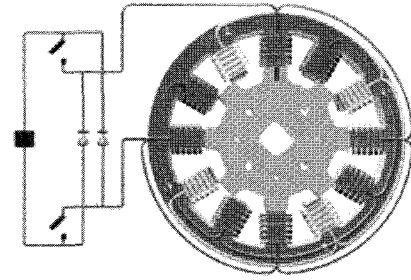


그림 10 스위치드 릴럭턴스 모터

4.2.2 스위치드 릴럭턴스 모터

현재까지 청소기용 유니버설 전동기를 대체하며 기술적 향상을 도모할 것으로 예상되는 모터는 스위치드 릴럭턴스 모터라고 할 수 있다. 릴럭턴스모터의 매우 단순한 회전자형태 때문에 고속 운전 시 발생하는 기계적 문제가 거의 없기 때문이다.^{[15]-[17]} 다만 기존 청소기의 속도를 훨씬 상회하는 속도에서의 제어능력, 제어기 가격, 또한 모터 이외의 베어링, 팬, 냉각구조 등의 기계적 조건도 근본적으로 재고되어야 하는 문제를 안고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 현재 대표적인 가전기기에서 사용되고 있는 모터의 종류와 모터의 선정 및 개발 배경을 설명하였고 진행 중인 고 효율화를 위한 기술방향에 대해 소개하였다. 유도기 기반 복합형 전동기를 통한 정속형 전동기의 고 효율화와 영구자석 동기전동기의 형상 최적설계 연구가 진행되고 있으며, 부가적으로 초고속 전동기의 기술적 구현이 미래 가전 모터의 모습이 될 것임을 서술하였다. 마지막으로 이를 위해서는 재료, 제작기술 등이 기술진보의 속도와 방향에 큰 영향을 미치므로 상호 협력이 매우 중요하다고 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] J. G. Veninott, *Theory and Design of Small Induction Motors*. New York: McGraw-Hill, 1959, pp. 184-197.
- [2] T. J. E. Miller, "Single-phase permanent motor analysis," *IEEE. Trans. Ind. Appl.*, vol. 21, no. 4, pp. 651-658, May/June. 1985.
- [3] M. A. Rahman, "Performance of large line-start permanent magnet synchronous motors," *IEEE. Trans. Energy Convers.*, vol. 5, no. 1, pp.211-217, Mar. 1990

모터 등의 유사특성을 원하는 응용분야가 많다는 점에서 기술적 가치가 높다고 볼 수 있다.

4.2 고속운전용 모터

가전기기중 청소기는 운전속도가 35,000rpm부근으로 가장 고속으로 운전되며 전력소모량도 비교적 크다. 따라서 청소기용 모터는 출력밀도가 상당히 높아 온도상승이 높고 소음이 크다. 또한 기술적으로 다른 모터에 비해 상대적으로 진화가 더딘 편이다. 이는 사용자의 편의성 증진을 위해서는 추가적 소형화가 필요한데, 이를 위해서는 모터의 운전 속도가 더욱 높아져야하며, 반대로 동시에 저소음화와 저 가격의 유지, 온도상승방지 등과 같이 극단적으로 상반된 개발 목표를 가지기 때문이다.

4.2.1 유니버설 모터

청소기에 사용되는 모터는 전통적으로 유니버설 모터이다. 유니버설 모터는 근본적으로 직류직권전동기와 동일하므로 무 부하 최대속도가 무한대로서 고속 운전 특성을 가진다. 따라서 모터의 토크특성은 청소기 부하에 가장 적합하다고 볼 수 있다. 그러나 브러시와 정류자를 갖는 직류전동기의 구조 때문에 짧은 수명과 낮은 효율이 가장 큰 단점이며 속도가 높아질수록 이 같은 현상이 더욱 심각해지는 문제가 발생한다.

- [4] B. T. Kim and B. I. Kwon, "Influence of Space harmonics on Starting Performance of a Single-Phase Line Start Permanent-Magnet Motor", *IEEE Trans. Magnetics*, vol. 44, no. 12, pp. 4668-4671, 2008.
- [5] M. A. Jabbar, T. S. Low, and M. A. Rahman, "Permanent magnet motors for brushless operation, Conference record- IAS Annual Meeting, pp. 15-19, 1988
- [6] Kano, Y, Kosaka, T, and Matsui, N, "Simple nonlinear magnetic analysis for permanent-magnet motors", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 41, no. 5, pp.1205-1214, 2005
- [7] Bianchi, N, Bolognani, S, and Frare, P, "Design Criteria for High-Efficiency SPM Synchronous Motors", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 21, no. 2, pp.396-404, 2006
- [8] Shanshan Wu, Reigosa, D.D, Shibukawa, Y, Leetmaa, M.A, Lorenz, R.D, and Yongdong Li, "Interior Permanent-Magnet Synchronous Motor Design for Improving Self-Sensing Performance at Very Low Speed", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 45, no. 6, pp.1939-1946, 2009
- [9] Jannot, X, Vannier, J, Marchand, C, Gabsi, M, Saint-Michel, J, and Sadarnac, D, "Multiphysic Modeling of a High-Speed Interior Permanent-Magnet Synchronous Machine for a Multiobjective Optimal Design", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol. 26, no. 2, pp.457-467, 2011
- [10] Sulaiman, E, Kosaka, T, and Matsui, N, "High Power Density Design of 6-Slot-8-Pole Hybrid Excitation Flux Switching Machine for Hybrid Electric Vehicles", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 47, no. 10, pp.4453-4456, 2011
- [11] Stumberger, B, Stumberger, G, Hadziselimovic, M, Marcic, T, Virtic, P, Trlep, M, and Gorican, V, "Design and Finite-Element Analysis of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor With Flux Barriers", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 44, no. 11, pp.4389-4392, 2008
- [12] Niazi, P, and Toliyat, H.A, "Online Parameter Estimation of Permanent-Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 43, no. 2, pp.609-615, 2007
- [13] Bianchi, N, Bolognani, S, Bon, D, and Dai Pre, M, "Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 45, no. 3, pp.921-928, 2009
- [14] Ostovic, V, "Memory motors" *IEEE Industry Applications Magazine*, vol. 9, no. 1, pp.52-61, 2003
- [15] Hasegawa, Yu, Nakamura, K, and Ichinokura, O, "Optimization of a Switched Reluctance Motor Made of Permendur", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 46, no. 6, pp.1311-1314, 2010
- [16] Omekanda, A.M, "Robust Torque and Torque-Inertia Optimization of a Switched Reluctance Motor Using the Taguchi Methods", *IEEE Trans. Ind. App.*, vol. 42, no. 2, pp.473-478, 2006
- [17] Vijayakumar, K, Karthikeyan, R, Paramasivam, S, Arumugam, R, and Srinivas, K.N. "Switched Reluctance Motor Modeling, Design, Simulation, and Analysis: A Comprehensive Review", *IEEE Trans. Mag.*, vol. 44, no. 12, pp.4605-4617, 2008

〈 필 자 소 개 〉



김병택(金炳澤)

1969년 2월 10일생. 1996년 한양대 공과대학 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1996년~2002년 삼성전기 종합연구소 2002년~2005년 LG전자 DA연구소 2005년~현재 군산대 전기공학과 부교수.