

직결식 세탁기용 BRUSHLESS DC MOTOR

이진원*, 김창준, 성부현, 원종화, 이유신
삼성전자(주), 기술총괄, 기반기술센타*

BRUSHLESS DC MOTOR FOR A DIRECT DRIVE
WASHING MACHINE

JIN WON LEE, CHANG JOON KIM, SUNG BOK HYUN, WON JONG HWA, YOUNG SHIN YI
CORE TECHNOLOGY RESEARCH CENTER, CORPORATE TECHNICAL OPERATIONS, SAMSUNG ELECTRONICS*

ABSTRACTS

This paper describes the BLDC motor which is applied for a top front loading domestic washing machine. This motor is adopted direct drive washing machine without gear-belt-pulley system. Because gear box is removed, machine volume and noise are reduced. Moreover mechanical troubles in gear box are removed. Realization of variable speed region through of PWM control and high speed is able to efficient washing and spinning.

1. 서론

대부분의 가정용 세탁기의 동력원으로 사용되고 있는 AC MOTOR는 탈수시의 고속회전과 세탁시의 HIGH TORQUE를 기어 및 벨트시스템으로 구성된 감속장치를 이용하여 구현하고 있다. 그러나 이러한 시스템은 감속장치에서의 손실 및 소음과 고장, 공간의 과다점유등의 단점으로 효율적인 세탁에 문제점이 되고 있다. 따라서 현재의 추세는 이러한 감속기를 사용하지 않고, 직접 MOTOR로 부터 구동동력을 이용하는 직결식 세탁기의 개발에 관심이 점증되고 있다.¹⁾⁽²⁾ 그러나 이러한 구동장치는 MOTOR 자체의 특성이 HIGH SPEED / HIGH TORQUE를 효율적으로 발생시킬 수 있어야 하므로 MOTOR 자체의 개발이 중요한 논점이 된다. 여기서는 이러한 MOTOR를 속도제어가 가능하여 효율적인 구동이 가능한 BRUSHLESS MOTOR로 개발하여, 탈수시에 고속회전은 OVER DRIVE라는 개념을 도입하여 정상구동과는 다른 방식의 구동으로써 가능하였다. 또한 세탁기 높이를 낮추고자 박형제작을 위하여 FLAT TYPE으로 설계하였으며, TEST를 통하여 실제적으로 응용이 가능한지를 점검하였다.¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

2. MOTOR 설계

2.1 직결식 세탁기 구조

개발 세탁기의 구조는 기존의 벨트-폴리의 감속장치와 클러치를 이용한 세탁-탈수의 구현과는 달리 MOTOR의 동력을 직접 PULSATON에 전달하는 구조이다. FIG.1은 이와 같은 세탁기의 구조를 나타내고 있다.

2.2 목표사양

TABLE.1 MOTOR SPECIFICATION*

| | TORQUE | RPM | CURRENT |
|----------|--------|-----------|---------|
| WASHING | 40[Nm] | 120[RPM] | 5[A]** |
| SPINNING | 5[Nm] | 1000[RPM] | 3[A] |

* 정격상태의 값임.

** 탈수시의 목표사양은 회전속도를 OVER DRIVE한 경우의 값임.

** PEAK VALUE임.

2.3 구조설계

2.3.1 구조설계의 FLOW

MOTOR의 형상은 MULTI-POLE/SLOT의 OUTER ROTOR-FLAT TYPE으로 설계하였다. 내부적으로 코아, 마그네트의 형상과 POLES, SLOTS, 고밀수등의 결정을 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 형상과 마그네트 치수를 결정하기 위하여 코아에서의 SATURATION 및 비가역감자 특성을 점검하였다. 코아의 포화정도를 파악하기 위하여 FEM해석을 실시하였다.

비가역감자 특성은 다음식에 의하여 결정하였다. 퍼미언스계수에 의하여 동작점이 결정되면, 전류인가시에 부하선의 변화를 살펴보도록 한다. 다음의 식은 이러한 관계를 나타내고 있다. H_m , B_m 은 부하입력시에 마그네트 동작점을 나타내고 있다.¹⁾⁽²⁾⁽³⁾

$$H_m = \frac{NI\sigma A_k}{\mu_r \lambda L_k A_m + L_m \sigma A_k} \quad (1)$$

$$B_m = \frac{\mu_r \sigma A_k}{\lambda L_k A_m} \times (-NI + H_m L_m) \quad (2)$$

σ : 누설계수, λ : 기자력순신계수, μ_r : 전공부자율, μ_r : 비부자율, L_g : 공극거리, A_m : 마그네트두께, NI : 입력, A_m : 마그네트 단면적, A_k : 공극단면적

(1), (2)식은 마그네트동작점을 나타내고 있다. 동작점은 최대전류 인가시에도 BH특성곡선상의 비가역점을 넘지 않도록 설계되어야 부하입력시에 마그네트의 감자현상을 방지할 수 있다.

$$\Phi_m = \frac{B_m A_m \sigma L_m}{\sigma L_m + \mu_r \lambda L_k} \quad (3)$$

(3)식을 볼 때 마그네트의 효율을 향상시키기 위하여 즉 동일체적에서의 자속값을 크게하기 위하여는 마그네트의 두께를 줄이고, 축방향길이를 늘이는 것이 효과적임을 보이고 있다. 그러나 이것은 MOTOR가 차지할 수 있는 공간과 (1)식에서 볼 수 있듯이 마그네트 감자에 두께가 감소 할수록 영향을 주므로 이를 감안하여야 한다. 다음은 형상설계를 위한 FLOW이다.

① DESIGN DIMENSION

② DESIGN MOTOR FOR WASHING MODE

③ OVER DRIVE ANALYSIS

④ FEM ANALYSIS

⑤ END

여기서 세탁점과 탈수점의 두개의 동작점에서 동시에 고효율을 얻기는 어려우므로 세탁기의 대부분의 출력이 발생하는 WASHING MODE 점을 위주로 MOTOR 특성을 설계하며, 탈수시는 고속회전을 얻기 위해 OVER DRIVE를 이용하는 방식을 택하였다. OVER DRIVE는 다음 절에서 언급한다.

MOTOR의 TORQUE-CURRENT-RPM 특성은 다음과 같이 결정된다.

$$T = K_t \cdot I, K_t = \frac{ZP\Phi_g}{2\pi K_a} \quad (4)$$

$$I = \frac{V - L \frac{dI}{dt} - K_b N}{R}, K_b = K_t \quad (5)$$

Z: total coil number, P: poles, L: inductance, Φ_g : gap flux
K_b: back emf constant, K_t: torque constant

(4), (5)식으로 부터, 극수가 증가함에 따라서 회전수와 전류가 감소하며, TORQUE는 증가함을 알 수 있다. TORQUE와 속도특성을 만족하는 POLES/SLOTS를 결정하기 위하여 이 비를 4/3으로 유지하고 극수를 변화시켜가면서 특성을 살펴 적절한 POLE/SLOT을 결정하였다. 식(6)은 MOTOR WINDING에서 발생할 수 있는 INDUCTANCE의 영향에 대해서 보여주고 있다.

$$\frac{dI}{dt} = \frac{V - K_b N}{L} \quad (6)$$

위의 식으로부터 고속영역에서의 전류구배가 역기전압의 상승으로 인하여 저속영역에 비하여 상당히 작은값임을 알 수 있다. 이것은 고속영역에서는 전류가 계산치에 부응할 수 있는 값이 입력되지 못함을 나타내며 이러한 영향은 실제적으로 회전수가 감소할 수 있음을 보이고 있으므로 INDUCTANCE가 큰 MOTOR에서는 이에 대한 보정이 요구된다. 본 설계는 세탁점, 40[Nm]에서 INDUCTANCE영향을 고려하여 실시하였다.^[1]

2.3.2 SPECIFICATION DETERMINATION

TABLE.2 PRINCIPAL SPEC. OF MOTOR

| | | UNITS [mm] |
|------------------|---------|------------|
| POLE / SLOT | 48 / 36 | |
| ROTOR HEIGHT | 32.5 | |
| ROTOR DIAMETER | 294 | |
| AIR GAP | 0.5 | |
| MAGNET THICKNESS | 6 | |

2.4 구동부 설계

2.4.1 기본 구동 회로

세탁기의 구동원으로 채용한 BLDC MOTOR를 DRIVE하기 위한 Y결선의 3상 MOTOR를 120° 전파구동 통전하는 INVERTER로 구성하였다. 구동 회로의 구조는 FIG.2와 같다. BLDC MOTOR의 장점인 LINEAR한 속도 제어를 위한 PWM구현에서 UPPER ARM과 LOWER ARM의 균일한 부하 동작을 위하여 UPPER와 LOWER측에 SELECTIVE한 PWM의 동기를 실행하였다. 또한, 가정용 세탁기에 적용시 BLDC MOTOR의 적용 POINT중 하나인 소음 저감을 위하여 PWM CARRIER주파수가 20[kHz] 이상에서 결정되도록 하였다. BLDC MOTOR의 회전자 위치 검출을 위하여 HALL I.C.를 사용하여 HALL신호를 직접 구동회로의 위치 판별 PORT에 입

력 되도록 제작 하였다.^{[1][2]}

2.4.2 세탁과 탈수의 구현

세탁과 탈수시의 요구 회전수에 상응하는 MOTOR구조 설계로는 FLAT TYPE의 BLDC MOTOR제작의 장점을 살리기 어려움으로 인하여 세탁시의 HIGH TORQUE에 만족하는 기본 설계를 바탕으로 탈수시에 적용할 수 있는 OVER DRIVE 기술을 TEST하여 얻어낼 수 있었다. HALL I.C.의 위치 DATA에 대한 HIGH TORQUE를 위한 120° 전파구동 SEQUENCE는 FIG.3(A)와 같다. 본 구동에서는 MOTOR의 설계점인 세탁성능 발휘를 위한 HIGH TORQUE구현에 역점을 두게 된다.

그러나 탈수시에는 고속회전을 요구하게 되므로 통상적인 120° 전파 구동 방식에서 얻을 수 있는 무부하 회전수로는 사양을 만족하지 못하게 된다. 따라서 여기서는 OVER DRIVE라는 구동방식을 제안하였다. 위치 DATA에 대하여, HALL 위치 DATA의 값에 60°의 LEADING ANGLE을 가지는 구동을 실시하여 무부하시에 사양을 만족하는 최고 회전수를 갖는 구동을 구현하였다.^[1] 이러한 구동방식을 본 논문에서는 OVER DRIVE라고 하였으며, OVER DRIVE시의 GATE구동 SEQUENCE는 아래의 FIG.3(B)와 같다. OVER DRIVE의 구현시에는 120° 통전 구동방식에 비하여 높은 전류 증가가 관측되었으나, 세탁물 부하와 함께 탈수시 요구되는 MOTOR 회전수 1000[RPM]에서는 적절한 PWM DUTY CONTROL에 의하여 전류의 제한이 가능하였다.

상기의 정상구동 및 OVER DRIVE구동으로써 세탁과 탈수시에 요구되는 회전수를 MOTOR 구조의 변경 없이 구현 가능하였다. FIG.4(A), (B)는 정상구동과 OVER DRIVE시의 MOTOR 파형을 보여주고 있다. 다음의 TABLE.3은 두 구동방식에서 얻을 수 있는 RPM, CURRENT이다.

TABLE.3 RPM & CURRENT THROUGH EACH DRIVING*

| | NORMAL DRIVE | OVER DRIVE |
|-------------|--------------|------------|
| RPM | 450 | 1950 |
| CURRENT [A] | 0.1 | 1.2 |

* AC 220[V], PWM DUTY 77[%], UNLOAD CONDITION

3. 결과

FIG.5는 MOTOR GAP FLUX DENSITY를 나타내고 있다. 공극에서의 자속밀도 파형은 비교적 TRAPEZOIDAL한 파형을 나타내고 있다. 이러한 파형은 전압제어를 통한 PWM CONTROL에 유리하다. FIG.6은 입력 전류값에 따른 발생 TORQUE를 나타내고 있다. 정격영역인 전류값 5 [A]이하에서는 TORQUE특성은 전류에 비례하여 선형적으로 증가하고 있다. 그러나 그 이상의 전류가 인가는 되는 경우에 코아에서의 포화가 발생하고 있다. 이것은 철심(코아)에서의 손실을 과도하게 증가시킴으로써 공극에 저장되는 자기에너지값을 감소시켜 유효기자력이 감소되어 발생하는 TORQUE값이 선형적으로 증가하지 못하게 된다. 따라서 MOTOR의 효율이 감소하게 된다. FIG.7은 즉정대이다와 이론적으로 계산한 TN DATA를 비교한 것이다. WASHING MODE의 정격영역인 40[Nm]부근의 영역에서의 데이터는 비교적 일치하고 있으나, 고속회전영역에서는 그 오차가 크게 발생하고 있는데 이것은 INDUCTANCE의 영향이 저속으로 가면서 적어지기 때문이다. 본 MODE에서는 세탁점의 영역이 주요 관심사이며 그 이하의 부하영역, 즉 탈수영역은 웓질에서 언급한 OVER DRIVE를 실시하므로 그 특성은 다르리라고 사료된다.

4. 결론

본 논문은 BLDC MOTOR를 채용한 직결식 세탁기에 관련한 것이다. 기존의 AC MOTOR를 대신하여 사용가능할 수 있음을 보았으며, 세탁과 탈수시에 각각 대응할 수 있는 모터 구조와 구동 제어 고안으로

에너지 고효율화에 기여할 수 있을 것이다. 또한 MOTOR형상을 박형으로 제작가능하여 기존의 높이를 상당히 줄일 수 있었다. 차기 연구로는 이러한 데이터를 바탕으로 하여 실제 시스템에 적용하여 그 특성을 점검할 필요가 있을 것이다.

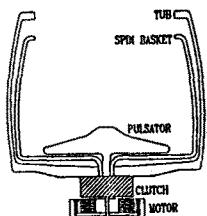


FIG.1 CONSTRUCTION OF DIRECT DRIVE WASHING MACHINE

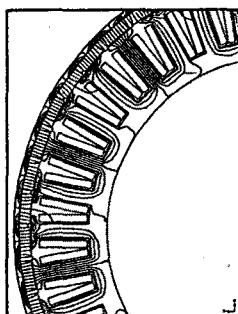


FIG.2 CONSTRUCTION OF DRIVE CIRCUIT

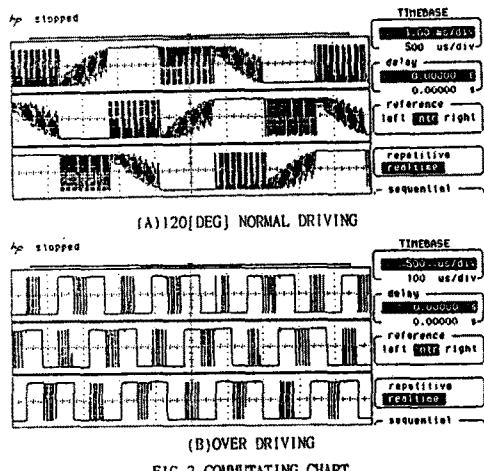
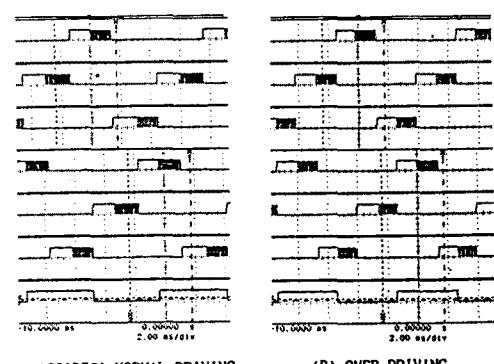


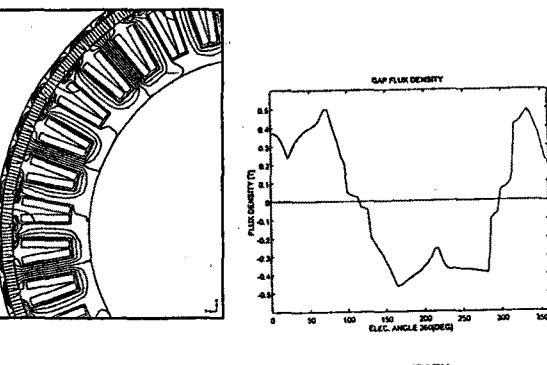
FIG.3 COMMUTATING CHART



(A) 120[DEG] NORMAL DRIVING

(B) OVER DRIVING

FIG.4 MOTOR WAVEFORM



(A) FLUX DISTRIBUTION (B) GAP FLUX DENSITY

FIG.5 FLUX DISTRIBUTION

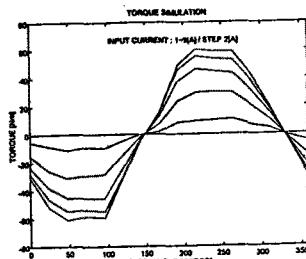


FIG.6 GENERATING TORQUE vs. INPUT CURRENT

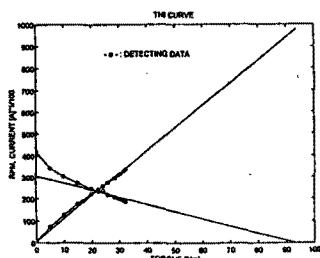


FIG.7 TORQUE-RPM OF SIMULATION vs. DETECTING DATA

5. REFERENCE

- [1] Fisher & Paykel, US Patent 4,841,207] 관련특허
- [2] K. Harmer, P. H Mellor, An energy efficient brushless drive system for a domestic washing machine, IEE, 1994
- [3] K Atallah, Flux waveforms and iron losses in permanent magnet brushless dc motor, 12th Int. workshop RE magnet
- [4] 김덕근, 윤종식, 원종수, 페라이트 자석 직류전동기의 치수설계에 관한 연구, 대한전기학회, 1989
- [5] 김덕근, 윤종식, 원종수, 페라이트 자석 직류전동기의 치수설계에 관한 연구, 대한전기학회, 1991
- [6] TJE Miller, Design of brushless permanent magnet motors, Clarendon press Oxford, 1994
- [7] 俗本茂也, エアコンコンプレッサ用ブラシレスDCモータ, JMA TECHNO FRONTIER WEEK '94, 1994
- [8] Takashi Kenjo, Power electronics for the microprocessor age, Oxford UNIV. press, 1990
- [9] B.K. Bose, Power electronics and AC drives pp166-pp206, Prentice Hall, 1987