

## 고효율 전기자동차를 위한 AFPM모터의 설계 및 제어

최해용, 최규하\*

현대기아자동차 연구개발본부, \*건국대학교 전기공학과

### Control & Design of AFPM Motor for High Efficiency EV

H.R. Choi and G.H. Choe\*

Hyundai Motor Company, \*Konkuk University

#### ABSTRACT

In this paper, control & design of AFPM Motor for Electric Vehicle is presented. Axial Flux Permanent Magnet Motors without Core are designed by numerical approach which is based on mechanical concept. This procedure consists of two parts: one is rotor magnet, the other is stator coil. And to evaluate the performance of target motor, various points like as BEMF and output characteristics are considered in this paper. Also simulation results & Experiments are provided to prove the novel motor design.

#### 1. 서 론

일반적으로 전기자동차용으로 고려되는 전동기는 DC모터, SRM(Switched Reluctance Motor), 유도기 그리고 PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) 등이다. DC모터는 제어성이 떨어지고 유지보수의 문제를 가지고 있어 제어용 모터로 대체되는 과정에 있다. SRM모터의 경우는 순간출력특성이 우수함에도 불구하고 토크맥동에 의한 소음진동이 적용의 가장 큰 걸림돌로 작용하고 있다. 유도전동기는 고효율 전기자동차에서 가장 적용성이 우수한 모터로 각광 받고 있지만 중소형에서는 적용상의 문제점을 지니고 있다. PMSM은 가격적인 열세가 적용상의 가장 큰 문제점으로 인식되고 있었으나 최근 영구자석의 가격이 현저하게 하락하는 시장환경에 따라 최근 서구유럽, 미국 및 일본의 하이브리드 전기자동차의 주요 전동기로 채택되고 있다. 특히 2005년 경에는 가격적으로 가장 경쟁력 있는 전동기가 될 것으로 예상된다.

PMSM은 자속의 발생방식에 따라 두 종류로 구

분할 수 있으며 하나는 Radial 구조모터이고 또 하나는 Axial 구조모터이다.[1] 두 구조의 차이점은 기구적인 면에 있으며 가장 명백한 차이는 모터의 회전토크를 발생시키는 공극 자속의 발생방식에 있다. 본 논문에서 제안하는 AFPM(Axial Flux Permanent Magnet)모터는 일반적으로 검토되고 있는 Radial 구조가 갖는 구조설계시의 제한요소를 개선하는데 있어 대안이 될 수 있으며 이는 Axial 구조가 갖는 고효율 특성과 우수한 기동토크특성 그리고 출력중대의 용이성에 기인한다.

따라서 본 논문에서는 고효율 하이브리드 자동차를 위한 AFPM 모터에 대해 고찰한다. 코어를 갖는 형과 코어가 없는 형에 대해서 각각 수학적 검토로부터 설계, 제작을 수행하며 전자기 및 기계설계법에 관하여 논의한다. 아울러 모터의 최적운전 특성을 위한 제어방식을 본 연구에서 제작된 모터에 대해 적용함으로써 출력특성의 최적화를 위한 방안을 제시한다.[2,3]

#### 2. AFPM모터의 설계

##### 2.1 AFPM Motor의 설계

코어없는 AFPM 전동기는 높은 효율과 우수한 고속운전 특성을 목적으로 설계되며 이러한 장점으로 EV시스템에서 다양한 분야에 적용될 수 있으며 특히 관성이 상대적으로 작아 시동특성이 우수한 특성을 갖는다. 무엇보다도 저속운전 시 코깅토크가 작게 발생되므로 부드러운 시동(Soft Starting)이 가능하다. 고정자에 코어가 없기 때문에 전류제어에 의한 자속의 제어가 상대적으로 어려운 문제를 갖고 있으므로 정출력을 내는 응용분야(Fan 등)에 적합한 전동기이다. 본 논문에서는 코어없는 전동기를 설계하는데 있어 전자기적인 관계로부터 공극유효자속의 세기를 얻는 방법을 기술하였고 이를 통하여 전기자동차에 적합한 모터특성을 얻을

수 있다.

1. 회전자 토크에는 직류자속이 흘러 히스테리시스 손이나 와전류 손 등 철손이 거의 없다.
2. 사다리꼴 자석이 최대 자석 면적설계가 가능하나 저비용설계를 고려하여 사각자석을 이용한다.
3. 희토류자석(Nd-Fe-B)은 자석밀도가 높고 굴곡점이 비존재한다.

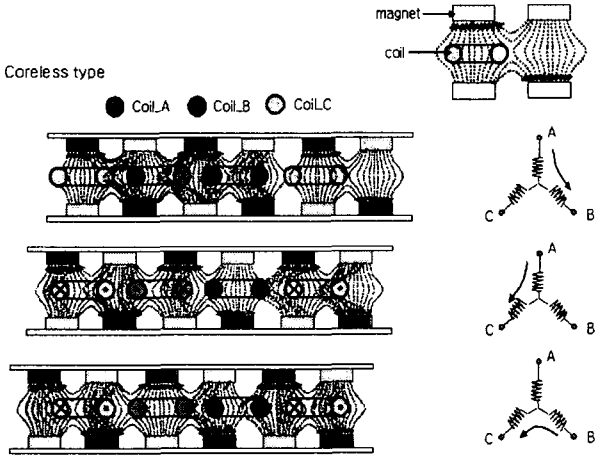


그림 2.1 코어없는 AFPM 모터의 조건별 자속 분포  
Fig. 2.1 Flux Distribution of Coreless AFPM 모터

### 2.1.1 동작점 자속밀도의 결정

영구자석모터는 기본적으로 영구자석에 출력의 가장 큰 비중을 가지고 있다. 앞서 가정에서 기술된 데로 제조비용상 사각자석의 선정이 유리하므로 사각자석의 면적은 아래와 같이 정의할 수 있다.

$$S_m = \omega_m \times \omega_m \quad (2.1)$$

회전자는 자석의 상측과 하측이 상이한 극으로 구성되도록 배치되며 유효한 기자력을 발생시키는 공극의 면적을 1극에 대해서 정의 하여야 한다.

$$S_m = \frac{\pi(D_a^2 - D_b^2)}{4P} \quad (2.2)$$

여기서  $D_a$  : 코일외경,  $D_b$  : 코일내경,  $P$  : 극수  
이렇게 자기회로를 구성하기 위한 경로가 결정되면 자기회로의 저항요소에 대한 정의가 필요하며 이것은 자석의 재질과 공극의 크기등 모터의 중요변수를 정의하고 모터의 동작점을 결정하는데 매우 중요한 지표가 된다.

$$P_c = \frac{L_m \times S_g \times k_f}{L_g \times S_m \times k_r} \quad (2.3)$$

여기서  $k_f$ : 기자력 손실계수

$k_r$  : 누설계수  $L_g$ : 자기회로상 공극의 길이

얻어진 퍼미언스값으로부터 기본적인 자기회로의 구성이 가능한데 자석재질의 종류 뿐만 아니라 자기회로상의 공극의 길이를 적절히 정의하여 가변성을 부여할 수 있다. 코어 없는 AFPM모터의 경우는 코일을 고정하기 위한 지지물로 PCB가 사용되기 때문에 이 또한 공극으로 고려되어야 한다.

$$L_g = \delta + \frac{(L_a + L_{pc})}{2} \quad (2.4)$$

여기서  $L_a$ : 코일의 높이  $L_{pc}$ : PCB의 높이

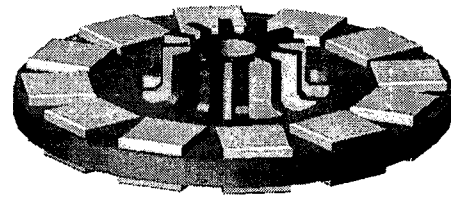


그림 2.2 코어없는 AFPM 모터의 회전자  
Fig. 2.2 Rotor Diagram of Coreless AFPM Motor

영구자석의 감자곡선상에서의 동작점 자속밀도를 구하려면 자석의 재질과 코일주변의 투자율을 고려해야하며 이러한 대수적 관계를 통해 모터의 운전점을 예측할 수 있다.

$$B_d = \frac{P_c \times B_r}{P_c + \mu_r} \quad (2.5)$$

여기서  $\mu_r = \frac{B_r}{H_c} = 1.05$

모터가 지니고 있는 자기에너지가 기계적인 에너지로 변환되는 과정이 공극에서 이루어지며 쇄교자속밀도의 계산이 요구된다.

$$B_g = B_d \frac{S_m}{S_g} \times \frac{1}{k_f} \quad (2.6)$$

일반적으로 자속의 부드러운 분포가 모터의 기구적 안정성을 보장하므로 공극자속밀도를 정현파로 분포시키는 것이 유효할 것이다.

$$B_{g(avr)} = \frac{2}{\pi} \times B_g \quad (2.7)$$

동작점에서의 자속밀도 계산을 통해 공극에서의 자속량을 구했으며 이러한 값은 FEM(Finite Element Method) 분석을 통해서 세부적인분포를 확인할 수 있다.

$$\phi_g = B_g \times S_g, \quad \phi_{g(avg)} = \phi_g \times \frac{2}{\pi} \quad (2.8)$$

### 2.1.2 고정자 코일의 설계

자석의 형상을 정의하는 것과 마찬가지로 고정자 코일에 대해서도 유효한 자기회로 구성을 위한 최소한의 단위에 대해 정의가 요구된다. 코어가 없는 구조상의 특이성으로 인해 코일의 형상은 코어가 있는 모터에 비해 상대적으로 용이하게 정의된다.

$$A_o = L_a \times L_b \quad (2.9)$$

여기서  $L_a$ : 코일의 높이  $L_b$ : 코일의 두께

점적율은 아래와 같이 표현되고 전류밀도를 향상시키기 위해 집중권을 사용하게 된다.

$$A_o = A_a \times \frac{SF}{100} \quad (2.10)$$

여기서 SF: 권선의 점적율

코일의 종류를 선정하기 위해 나동선의 면적을 정의하고 그 피복의 조건은 코일면적의 정도에 따라 적절한 값으로 선정한다.

$$A_w = \left(\frac{d}{2}\right)^2 \pi \quad (2.11)$$

여기서 d: 나동선 직경

손실의 최적화를 모터코일의 종류로 연선의 사용이 가능한데 이럴 경우 설계시 코일당 턴수를 표현하면 다음과 같다.

$$Z = \frac{A_o}{A_w} \quad (2.12)$$

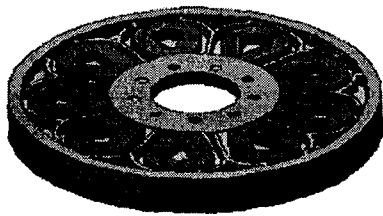


그림3.5. 코어없는 AFPM 모터의 고정자

Fig. 3.5 Stator Diagram of AFPM Motor without Core

모터의 코일에 있어 가장 기본적인 정보는 저항이며 도체길이나 코일재질에 따른 저항률을 통해 알 수 있다.

$$l_c = z \times l_{turn} = z \times (z \times L_{en1} + L_{en2} + L_{en3} + \left(\frac{L_b}{2}\right) \times \left(\frac{5\pi}{8} \times 2 + \frac{3\pi}{8} \times 2\right)) \quad (2.13)$$

$$R_{coil} = \rho \times \frac{l_c [m]}{g [mm^2]}, \quad (2.14)$$

( $\rho = 0.021$ , 구리의 경우)

여기서  $g = Aw$ ,  $l_c$ : 도체길이,  $g$ : 도체단면적

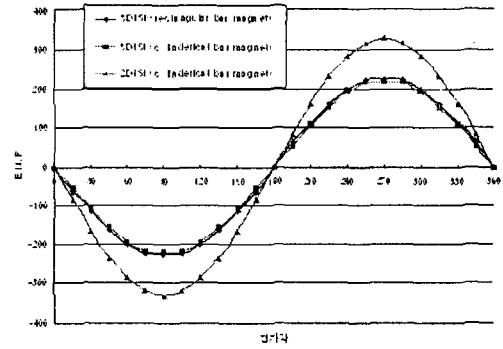


그림3.6 역기전력파형

Fig. 3.6 EMF waveform

## 3. AFPM모터의 제어

### 3.1 직축전류 영점제어

직축전류영점제어는 표현 그대로 d축의 전류를 0으로 만들고 q축 전류가 기준전류신호를 추종하게 하는 제어기법이다.

앞에서 검토한 데로 토크 식은 아래와 같이 표현되는데 여기서 d축전류를 0으로 제어하게 되면 결국 q축 전류에 의해서만이 토크가 발생됨을 확인할 수 있다.

3상 전압형 컨버터/인버터를 제어할 때 단위역률 제어를 위해 d축성분을 0으로 설정하는 것과 같은 개념의 제어방식이며 모터의 기계적 토크축력은 q축성분에만 의존하게 된다. 이것은 모터 설계관점에서 볼 때 자석의 균일한 배치에 따라 q축과 d축의 인덕턴스가 평형이 되어 발생하는 제어기법이다. 따라서 d축전류에 의한 리플턴스 토크는 발생하지 않으며 전류와 토크의 선형성을 확인할 수 있다. 따라서 제어기의 구현이 매우 단순화되는 장점을 갖는다. 최근에 고출력 PMSM모터의 추세를 볼 때 모터의 순간 최대출력을 극대화하는 방향으로 많은 연구가 진행되고 있다. 이 방식은 결국  $i_d \neq 0$  제어에 의해 구현되는데 이것은 전류제어만이 아닌 모터의 회전자의 기구적인 고려가 필요한 제어 개념이다. 그러나 모터의 과도성이 증대되고 제어기의 구현이 다소 복잡해지는 문제가 상충관계가 되어 두 가지 방식 모두 응용분야의 특성에 따라 선정된다.

$$\begin{aligned} T &= P_n \{ \phi_a i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \} \\ &= P_n \left\{ \phi_a I_a \cos \beta + \frac{1}{2} (L_q - L_d) i_a^2 \sin 2\beta \right\} = T_m + T_{reluctance} \quad (3.1) \\ &= P_n \phi_a i_q \quad (i_d = 0) \end{aligned}$$

### 3.2 최대속도제어(약계자제어)

인버터 입력전압이 제한적이기 때문에 모터구동을 위한 단자전압 및 구동전류의 조건은 다음과 같이 제한 된다.

$$V = \sqrt{V_d^2 + V_q^2} \leq V_{lim} \quad (3.2)$$

즉

$$\text{(전압제한)} \sqrt{(r_i - \omega L_d i_q)^2 + (r_i + \omega L_d i_d + \omega \phi_r)^2} \leq V_{lim} \quad (3.3)$$

$$\text{(전류제한)} i_d^2 + i_q^2 \leq i_{lim}^2 \quad (3.4)$$

전기자 저항에 의한 전압강하를 무시하면

$$V = \sqrt{(\omega L_q i_q)^2 + (\omega L_d i_d + \omega \phi_r)^2} \leq V_{lim} \quad (3.5)$$

단자전압이 제한 전압에 이르게 되면 속도는 더 상승하기 어려워지고 약계자제어라는 개념을 이용 속도를 상승시키게 된다. 결국 위 식에 음의  $I_d$  전류를 인가하면 속도는 증가하게 된다.

이 기간동안 모터단자전압은 인버터 출력전압의 최대고 고정되고 이때의 전류는 다음과 같다.

$$i_q = \sqrt{\left(\frac{V_{lim}}{L_d \omega}\right)^2 - \left(\frac{\omega_r}{L_d} + i_d\right)^2} \quad (3.6)$$

이에 따른 기계각 속도

$$\omega = \frac{V_{lim}}{P \sqrt{(\phi_r + L_d i_d)^2 + (L_d i_q)^2}} \quad (3.7)$$

결국 음의 d축전류를 인가함으로써 q축전류도 다소증가하게 되지만 아래식으로부터 기계각속도가 증가하게 됨을 알 수 있다.

## 4. 시뮬레이션

본 장에서는 모터의 운전영역을 확인하기 위해 몇 가지의 디지털 프로그램을 이용하여 AFPM모터의 설계 및 제어특성을 확인한다. 선형시스템의 수치해석을 위해 널리 사용되고 있는 Matlab의 윈도우 버전인 GUI를 이용하여 HEV용 AFPM 모터의 구상설계 프로그램을 작성하였고 이를 통해 구동모터 전자기적인 특성의 확인과 기구적인 사이즈의 윤곽을 규정한다. 이렇게 얻어진 모터 모델을 가지고 운전특성을 확인하기 위해 전기회로 프로그램을 이용하여 구동특성 및 제어 특성을 확인하고자 한다. 또한 전기회로 전문 소프트웨어인 PSIM(Power Simulation)을 사용하며 알고리즘의 검증은 위하여 이용하여 AFPM 모터의 설계 및

제어 특성의 시뮬레이션을 수행하였다.

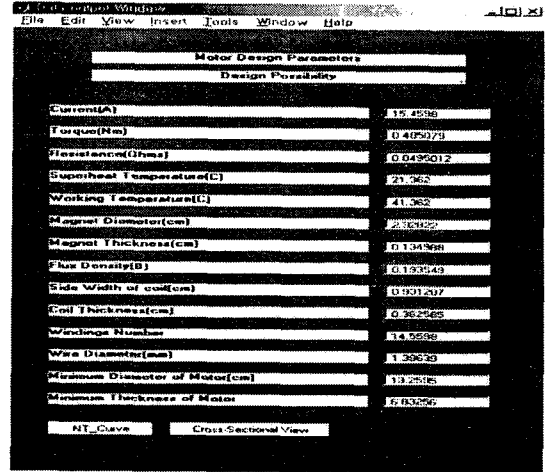


그림 4.1 모터출력특성(I)

Fig. 4.1 Results of Motor Design. (I)

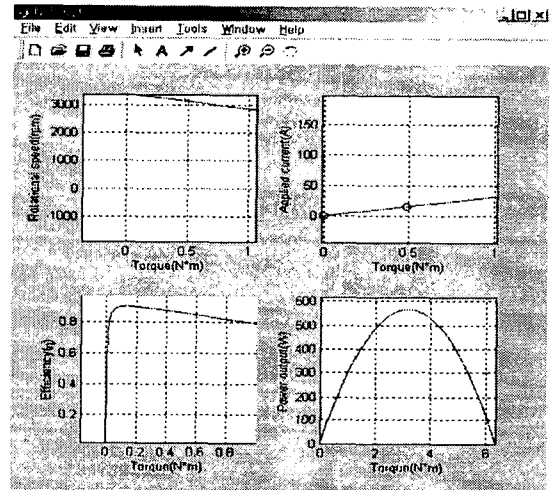


그림 4.2 모터출력특성(II)

Fig. 4.2 Results of Motor Design. (II)

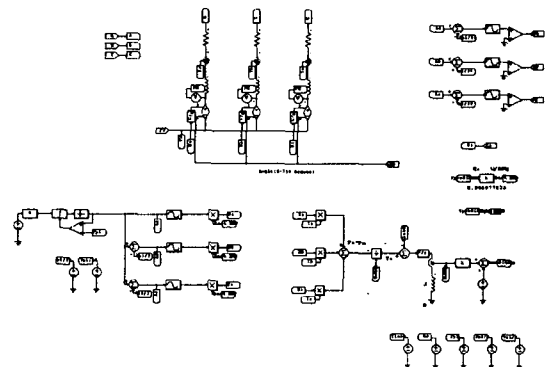


그림 4.3 DLL을 이용한 3상 AFPM모터 모델링

Fig. 4.3 Three phase AFPM Motor's Model Using DLL

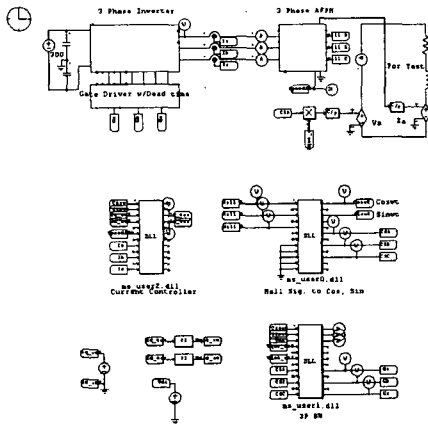


그림 4.4 DLL을 이용한 3상 AFPM모터 구동시스템  
 Fig. 4.4 Overall System of Three Phase AFPM Motor Using DLL

### 5. 실험

코어없는 AFPM모터는 코어에 의한 비선형적인 자속의 왜형이 일어나지 않으므로 역기전력의 형상이 거의 정현파에 가까운 것을 그림 5.1을 통하여 확인할 수 있다.

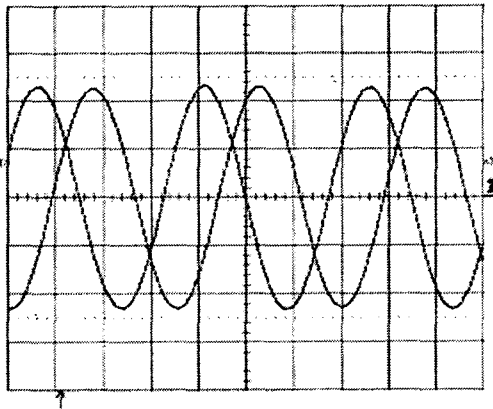


그림 5.1 코어없는 AFPM모터의 역기전력(I)  
 Fig. 5.1 EMF of AFPM Motor without Core(I)

AFPM모터의 120도 전류구동시에 전류파형이 매우 급하게 상승하는 것을 확인할 수 있었다. 모터의 전류파형은 모터의 동특성에 큰 영향을 주므로 구동시 3고조파를 포함하는 정현파구동을 통해 전류리플을 최소화하고 진동소음을 개선할 수 있다. 이 방식은 180도 도통을 기본으로 하므로 작은 인덕턴스에도 불구하고 전류의 갑작스런 상승을 막을 수 있으므로 모터의 토크리플을 최소화할 수 있다.

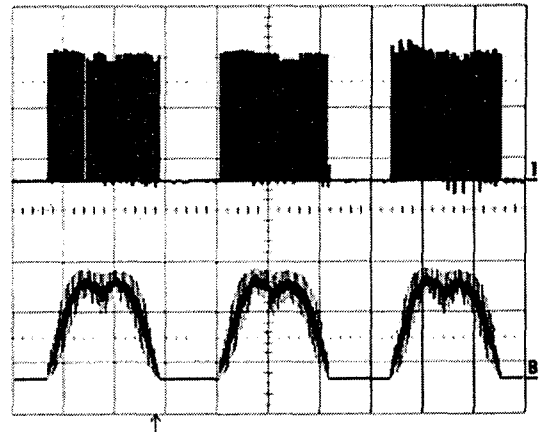


그림 5.2 정현파구동시 모터 단자전압  
 Fig. 5.2 Terminal Voltage on Sinusoidal Operation.

### 6. 결론

본 논문에서는 전기자동차의 적용을 위한 새로운 개념의 모터에 대해 설계와 제어기법에 관하여 기술하였다. 코어가 없는 AFPM모터의 경우 역기전력이 정현파의 모양을 가지므로 코깅이 최소화됨을 확인할 수 있다. 또한 제어에 있어서 전기자동차에 요구되는 제어기법에 대해 기술하였으며 출력특성에 있어 SPM모터의 특성과 유사함을 예측할 수 있다. 추후 실험을 통해 위의 수학적 전개과정에 대한 검증작업이 요구되며 모터의 전자기적인 특성에 대해 고찰하고자 한다.

### 참고 문헌

- [1] Takaø Kawabata, "An approach to sensorless operation of the permanent-magnet synchronous motor using diagonally recurrent neural networks," IEEE Trans. on Industrial Application, Vol. 24, No. 2, March, 1988, pp. 281-287.
- [2] Duan Shanxu, "A direct torque controller for permanent magnet synchronous motor drives," PEDS'99 of IEEE, July, 2000, Hongkong, pp. 883-887.
- [3] Heran, "Performance analysis of fuzzy logic controlled permanent magnet synchronous motor drives," IEECON of IEEE,