

병렬형 하이브리드 구동용 매입형 영구자석동기전동기 설계에 대한 연구

論 文

53B-12-4

A Study on the Design of Flat-Type IPMSM in Parallel Hybrid Traction Application

金基男[†] · 梁海元^{*}
(Ki-Nam Kim, Hai-Won Yang)

Abstract - This study investigates the design factors of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor(IPMSM) which is applied to Hybrid electric vehicle as a driving power. Recently, there are many studies of IPMSM for application to Hybrid Electric Vehicle, because IPMSM has characteristics of high torque, high power density and high efficiency which come from reluctance torque due to difference of inductance as well as magnet torque. This study analyzes the inductance and design characteristics of IPMSM by using finite element method and focuses on design and analysis of IPMSM which can operate with high efficiency at low speed range. For this embodiment, magnet shape is changed from conventional block type to arc type without any change of outline dimension of motor and this change of magnet shape makes it possible to increase back EMF and sinusoidal waveform. Analysis results are verified by test of improved and embodied motor. As a test result, increased back EMF and sharply decrease of harmonics are secured and through this contribution of reduced fuel consumption of Hybrid electric vehicle is expected.

Key Words : IPMSM, Parametric Analysis, FEM, Traction Motor, Maximum Power

1. 서 론

최근 에너지 및 환경규제가 심화되어 기존 엔진구동방식이 아닌 새로운 방식의 미래형 자동차개발에 차량 업계에서는 앞 다투어 기술력을 집중시키고 있다. 특히, 환경 및 에너지고갈 그리고 최근의 유가급등에 대한 관심이 고조되면서 하이브리드 차량개발에 대한 관심이 어느때보다 절실히 요구되고 있다.[1-3]

가솔린엔진과 전동기를 함께 사용하는 하이브리드차의 경우, 높은 연비 및 낮은 배기가스로 인해 일본을 비롯한 선진국에서 상업화는 물론 최근에 판매가 급증되고 있으며, 또한 세계각국의 환경규제 강화로 환경친화형 자동차 개발이 자동차업계의 생존조건으로 부상되고 있으며, 이런 연유로 국내에서도 성장동력분야로 지정되어 핵심기술개발에 총력을 기울이고 있다. 이런 하이브리드 전기자동차 구동전동기로는 소형경량화, 고효율밀도, 고효율성 등의 특징을 갖는 에너지 밀도가 높고 운전영역이 넓은 매입형 영구자석 동기전동기(Interior type Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)가 대부분 적용되고 있으며, 차량운전조건에 부합되는 특성을 갖는 전동기개발에 초점을 맞추어 개발진행중이다.[1-3]

하이브리드자동차용 매입형 영구자석 동기전동기의 경우

제한된 전원과 소형,경량화를 위하여 에너지 밀도가 높으면서 동시에 빈번한 가속, 고토크특성 및 고속주행의 특성을 만족해야 한다. 그러나 국내의 경우 매입형 영구자석전동기의 개발경험은 많으나 차량 구동용으로서의 차량 및 엔진 운행조건에 부합되는 구동특성을 갖는 시스템제어특성을 고려한 전동기 기술개발이 부족하여 이에 대한 부분이 시급히 요구되어지고 있다.[4-7] 매입형전동기는 비대칭적인 자기특성으로 인해 릴럭턴스토크가 발생하게 되고 이것을 활용함으로써 어느 특정한 전류위상에서 단위전류당 토크를 크게 할수 있는 특징을 갖는다. 그러나 자기적인 불평형은 역기전력특성에 고조파 성분을 갖기쉽고 이로 인해 정현파 제어 특성에도 악영향을 미칠수 있음으로 역기전력에 고조파성분을 최소화 시키는 전동기 설계가 요구된다.[7-11]

본 논문에서는 IPMSM의 자기회로 및 등가회로를 구성하여 특성해석을 위한 기본 방정식을 제시하고, 차량 실제 운전범위에서 전동기의 최대효율운전이 가능토록 하였으며, 정현파 전류제어를 위해 역기전력의 고조파성분을 최소화 시킬 수 있는 설계부분에 대해서도 중점 고찰하였고, 제한된 차량의 장착공간에서 인버터의 전류용량을 줄이기 위해 모터의 토크상수를 최대화시키는 설계인자에 대해 검토하였다. 제시된 설계인자에 대한 특성해석은 시험을 통해서 그 타당성을 검증하였고, 기 개발된 전동기와 비교하여 개선방향을 검토하였다.

2. 하이브리드용 매입형 동기전동기

본 논문에서 제시하는 전동기는 하이브리드 자동차용으로 엔진과 직결되는 병렬형 하이브리드 방식으로 엔진과 동

[†] 교신저자, 正會員, 현대자동차 연구소. 선임연구원
E-mail : knkim60@hyundai-motor.com

^{*} 正會員 : 漢陽大學校 전자컴퓨터 공학부 교수
接受日字 : 2004年 10月 5日
最終完了 : 2004年 10月 20日

일한 속도로 회전하게 된다. 이 같은 적용에는 차량의 운행 조건에 맞는 전동기 설계가 요구되어지며, 차량연비향상을 위해 가장 빈번히 사용되는 차량운행조건에서 전동기의 최대효율운전이 가능토록 설계하는 것이 무엇보다도 중요하다. 그림 1은 하이브리드 차량의 주행모드에 따른 엔진의 동작영역을 실제 측정된 데이터로써 2000rpm 부근에서 대부분 작동되고 있음을 알 수 있다. 따라서 엔진과 동일한 속도로 구동되는 전동기 작동범위도 이 영역에서 최대효율점이 운전되도록 설계되어야 한다. 그러나 기 개발된 전동기는 그림 2와 같이 이런 부분의 검토가 충분하게 되질 않아 최대효율운전영역이 3000~4000rpm부근으로 작동되어 차량의 요구특성에 부합이 되지 않고 있음을 볼 수 있다.

본 논문에서는 이런 불합리성을 보완하기 위해 전동기의 설계 변수 검토 및 특성해석을 수행하였으며, 특히 회전자에 배치되어 있는 영구자석의 형상을 변경시켜 저속구간에서 최대효율점이 운전되는 전동기의 설계를 제안한다.

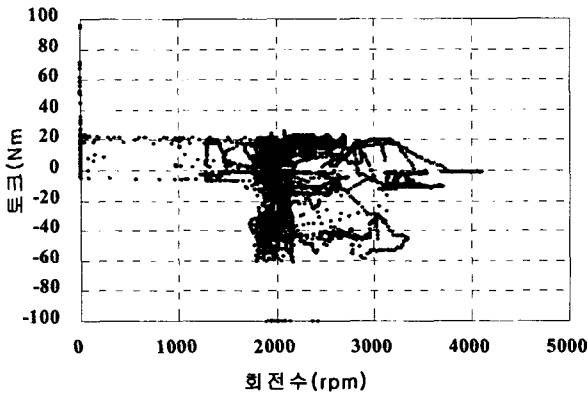


그림 1 하이브리드 자동차의 동작영역
Fig. 1 Operating Range of Hybrid vehicle

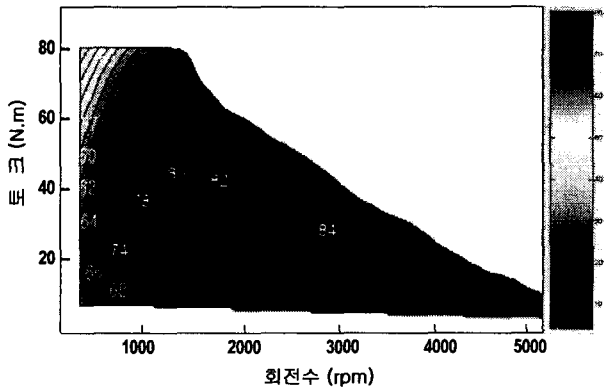


그림 2 기존 영구자석 전동기(블록형)의 효율특성
Fig. 2 Efficiency-Map of old-type IPMSM

2.1 매입형 동기전동기의 특성

영구자석이 회전자 내부에 매입되어 있는 IPMSM은 고속회전시, 영구자석 이탈을 방지할 수 있고, d축과 q축 인덕턴스 차이로 인해 그림 3에서와 같이 릴럭턴스 토크가 발생

하며 특정한 전류위상에서 영구자석에 의한 토크보다 큰 토크를 얻을 수 있다. 또한 전동기에 흐르는 전류의 위상제어를 통해 토크-속도 운전영역의 확대가 가능하게 되며 이러한 특성은 동일한 크기의 표면부착형 영구자석 전동기에 비해 효율적인 전동기설계를 가능하게 한다.

차량구동용 전동기의 운전영역은 가속특성이 필요한 정토크 영역과 고속운전 영역인 정출력 영역으로 나눌 수 있다. 일반적으로 정토크 영역에서는 최대토크제어, d축 전류 제어, 역률제어 및 공극자속 일정제어 등이 사용되고, 정출력 영역에서는 운전 영역을 넓히기 위해 약계자제어 기법이 사용된다.

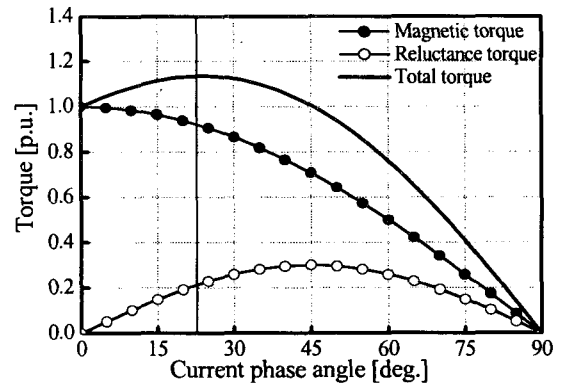


그림 3 발생토크
Fig. 3 Generated Torque

2.2 IPMSM의 등가회로 및 벡터도

하이브리드용으로의 응용성이 우수한 IPMSM은 역률극성의 자기 특성을 갖고 있기 때문에 일반적으로 d-q축으로 나누어 특성을 해석한다.

그림 4에 본 논문에서 고찰하는 IPMSM의 전동기 모드에서의 등가회로를 나타내었다.

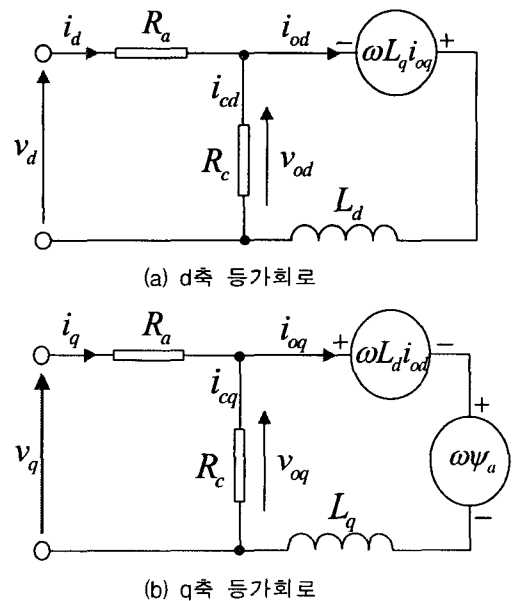


그림 4 전동기의 등가회로
Fig. 4 Equivalent Circuit of Motor

여기에서 R_c 는 철손의 등가저항이며, Ψ_a 는 극당 유효자속이다.

그림 4의 d-q축 전압방정식은 식(1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_a \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} + p \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{bmatrix} v_{od} \\ v_{oq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\omega L_q \\ \omega L_d & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{od} \\ i_{oq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \psi_a \end{bmatrix}$$

그리고 등가회로로부터 전압은 식(2)~식(4)와 같은 관계가 성립하고 역률은 식(5)과 같으며, IPMSM의 발생토크는 식(6)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_0 = \sqrt{v_{od}^2 + v_{oq}^2} = \omega \Psi_0 = \omega \sqrt{(L_d i_d + \Psi_0)^2 + (L_q i_q)^2} \quad (2)$$

$$V_a = \sqrt{v_d^2 + v_q^2} = \sqrt{(R_a i_d - \omega L_q i_q)^2 + (R_a i_q + \omega L_d i_d + \omega \Psi_0)^2} \quad (3)$$

$$v_d = -V_a \sin \delta, \quad v_q = V_a \cos \delta \quad (4)$$

여기서, 정상상태에서 $V_a = V_r$ 이고 V_r 은 선간전압의 실효치이며, Ψ_0 는 쇠교자속이다.

또한, 역률과 전류위상각과의 관계식은 아래와 같다.

$$\cos \varphi = \cos(\delta - \beta) \quad (5)$$

여기서, β 는 전류위상각, δ 는 부하각, θ 는 역률각이다.

$$\begin{aligned} T &= P_n \Psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q \\ &= P_n \Psi_f i_q \cos \beta + \frac{1}{2} (L_d - L_q) I_r^2 \sin(2\beta) \\ &= T_m + T_r \end{aligned} \quad (6)$$

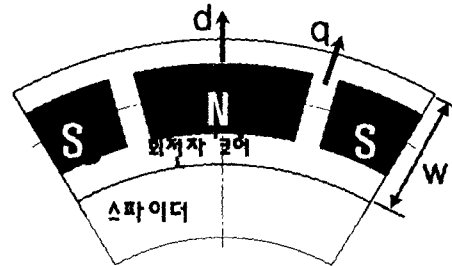
여기서, T_m 은 마그네틱 토크이고, T_r 은 릴럭턴스 토크이다.

3. 매개변수 설계

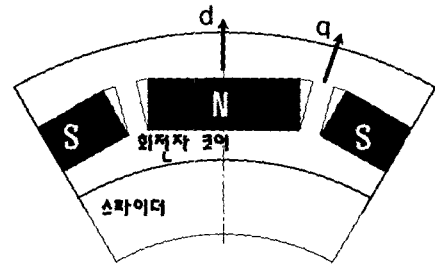
3.1 고효율점 이동을 위한 회전자설계 방안 검토

전동기의 고효율 운전점을 저속영역으로 옮기는 방안으로 공극자속밀도를 증대시켜 역기전력상수를 증대시키는 방안을 중점 검토하였다. 이를 위해 종래의 블록형 영구자석형상을 스포크형, V-형, 아크형등 몇가지 자석배치를 검토하였으나, 차량장착조건에 기인한 제한된 회전자코어의 크기(그림5(a)에서 w부분: 약13mm)를 고려할 경우, 아크형의 배치가 가장 적합하였다. 따라서, 본 논문에서는 그림5(a)에서와 같이 회전자에 영구자석을 아크상으로 배치함으로써 d축과 q축 인덕턴스 차이로 발생하는 릴럭턴스를 증대시키면서 아울러 공극에서의 자속분포를 정현적으로 분포시키고 자속

밀도를 증대시키는 구조를 고안하였다. 고정자 코일의 점적율을 극대화시키기 위해 권선을 집중권으로 구성되면 자속이 공간적 고조파성분을 많이 함유하게 되므로 자속에 의한 고조파성분을 최소화하는 것이 또 하나의 중요한 설계 관점이 된다. 이런 관점에서 종래의 전동기 형태인 그림5(b)에서와 같이 블록형의 영구자석을 적용할 경우, 공극자속밀도가 줄어들 뿐 아니라, 자속에 의한 고조파 성분이 증가하게 되어 토크제어의 정밀도 저하의 원인이 된다.



(a) 제안된 영구자석 구조(Arc형)



(b) 블록형 영구자석 구조

그림 5 영구자석 동기 전동기의 회전자 구조
Fig. 5 Rotor Configuration of IPMSM

하이브리드용 전동기 기본모델의 운전 특성에서 약계자 영역인 정출력 구간의 운전특성 개선이 필요하다. 이 구간에서 운전 특성 개선을 위한 방안으로는 크게 전동기의 형상을 수정하지 않고 약계자 구간의 제어기법 만을 개선한 경우와 전동기의 형상을 변경하여 전동기 회로 정수를 변경하여 특성을 개선하는 방안을 들 수 있다. 그림 6에는 단위 인덕턴스와 유기전압에 대한 출력 분포도를 나타내고 있는데, 최대출력을 높이고 약계자 운전범위를 확장하기 위해서는 큰 유기전압과 적은 인덕턴스 특성을 가져야 한다. 따라서 본 연구에서는 기본모델의 정출력 구간의 운전특성 개선을 위하여 전동기 회전자의 영구자석 배치를 아크형으로 변경하여 자속의 이용율을 높여 유기전압을 많이 확보할 수 있는 개선모델의 전동기에 대하여 검토하였다.

3.2 FEM에 의한 인덕턴스 산출

비선형적인 자기특성을 가지는 하이브리드 자동차구동용 IPMSM의 d-q축 인덕턴스를 산정하는 방법으로 유한요소법을 이용하는 것이 매우 유용하다. 인덕턴스를 산정하는 방법으로는 자속쇄교법과 에너지 중첩법이 이용되고 있는데

본 논문에서는 에너지 중첩법(고정 투자율법)을 이용하였다. 에너지 중첩법은 여자전류와 저장에너지로부터 인덕턴스를 계산하는 방법이다. IPMSM은 자기적으로 비선형 영역이 존재하기 때문에 에너지 중첩법을 성립시키기 위해서 영구자석과 고정자 전류를 동시에 여자하여 비선형해석을 한 후 각 요소에서의 투자율을 이용하여 고정자 전류만을 다시 여자하고 선형해석을 통해서 d-q축 인덕턴스를 산정하였다. 이러한 인덕턴스 산정 과정을 그림 6에 나타내었다. 인덕턴스를 구하기 위해서 먼저 고정자의 권선 배치를 A상을 기준으로 d축을 중심으로 모델링하고 비선형해석을 수행한 후, 그림 5에서와 같이 크기가 1인 3상 전류를 이용하여 d축과 q축의 인덕턴스를 각각 구할 수 있다[9-11]. 이렇게 구해진 저장에너지와 d-q축 각각의 인덕턴스는 다음과 같은 관계식이 성립한다. 전동기 입력전류 I_a 는 상전류 I_e 와 다음과 같은 관계를 가진다.

$$I_a = \sqrt{3} I_{erms} = \frac{\sqrt{3}}{2} I_{emax} \quad (7)$$

여기서, I_{erms} 는 상전류 I_e 의 실효치, I_{emax} 는 상전류 I_e 의 최대값이다.

선형 해석시 고정자의 권선 기저력에 위한 자극을 d축에 세우면 d축 전류는 $i_d = I_a$, 또는 q축에 세우면 q축 전류는 $i_q = I_a$ 가 성립한다. 이때 산정된 d-q축 저장에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$W_{d,q} = \frac{1}{2} L_{d,q} i_{d,q}^2 = \frac{1}{2} L_{d,q} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} I_{emax} \right)^2 = \frac{3}{4} L_{d,q} I_{emax}^2 \quad (8)$$

여기서 상전류 최대치가 1인 3상 전류를 인가한다면, d-q축 저장에너지와 각각의 인덕턴스는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$W_{d,q} = \frac{1}{2} L_{d,q} \left(\frac{\sqrt{3}}{2} \times 1 \right)^2 = \frac{3}{4} L_{d,q} \quad (9)$$

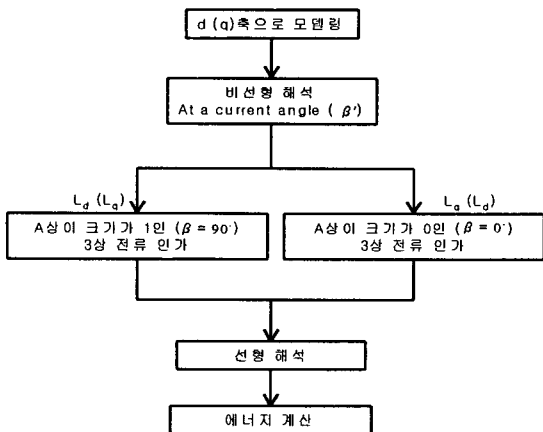


그림 6 유한요소법을 이용한 인덕턴스 계산 과정
Fig. 6 Process of Inductance Calculation by FEM

본 연구에서 대상으로 하고있는 전동기는 하이브리드자동차 구동용으로서 엔진과 트랜스미션사이에 위치하며 제한된 장착공간 및 고출력요구특성으로 인해 길이가 짧고 직경이 상대적으로 큰 박형타입으로서 16극 24슬롯의 구조를 갖고 있으며, 사용된 전기자와 회전자 코어의 재질은 S18이다.

영구자석은 잔류자속밀도 1.05[T]인 NdFeB 계열의 희토류자석이며, 전기자권선 전류는 전동기의 운전전류를 고려하여 275[A]까지를 해석하였다. 자기회로 구조상 고정자 권선의 배치와 영구자석 배치에 따른 d-q축 자기회로가 대칭적이지 못하므로 두가지 자기회로 상태에 대해서 d-q축 인덕턴스를 각각 구하여 평균값을 취했다. 한편 전기자 권선 단부에서의 누설인덕턴스는 다음 식으로부터 산정하였다 [11].

$$L_{end} = 0.002 \pi^2 a \left(\frac{2a}{b} \right) N^2 K \quad [\mu H] \quad (10)$$

여기서, $2a$ 는 코일 직경, b 는 코일 높이, N 은 상당 직렬 턴수, K 는 나가오카 계수를 각각 나타낸다.

3.3 프린징 효과

고정자와 회전자의 축방향길이가 다른 경우 3차원 FEM을 이용한 자속비교를 통해 오버행효과를 고려하기 위해 그림7과 같이 두가지 모델링을 하여 자속을 비교하였다.

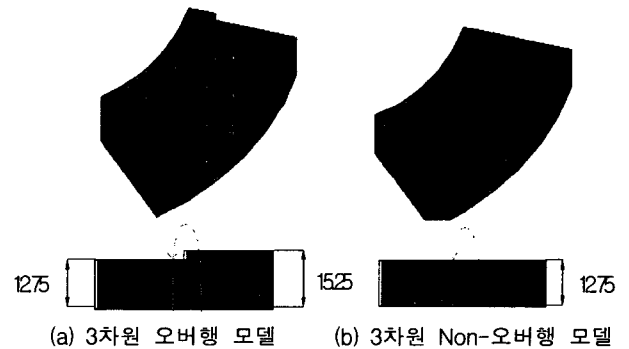


그림 7 3차원 오버행 해석모델
Fig. 7 3D model for overhang effect

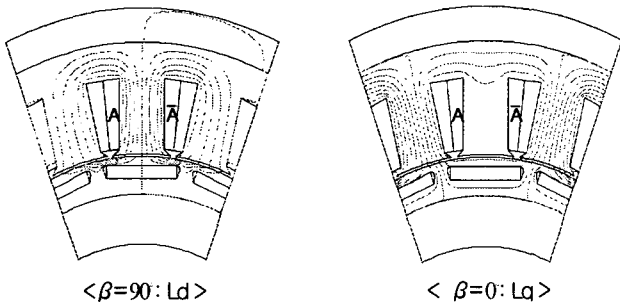
3.4 해석 결과

그림 8은 d축과 q축으로 각각 구분하여 해석한 경우의 자속분포를 나타내고 있으며, 본 논문에서는 두 방식으로부터 얻어진 결과를 평균화하여 데이터를 얻었다. 그림 9,10은 전류위상각 변화 및 부하전류에 대한 인덕턴스를 해석결과를 나타내고 있는데 전류가 증가할수록 인덕턴스가 감소하며, 또한 인덕턴스 차이가 점차 줄어들음을 알 수 있다. 또한 앞절에서 언급한 오버행 효과에 대해 3차원으로 쇠교자속량을 해석한 결과 오버행이 없는 경우 0.335(wb), 오버행이 있는 경우 0.387(wb)로써 약 16%의 자속량 증대효과가 있는 것으로 나타났다.

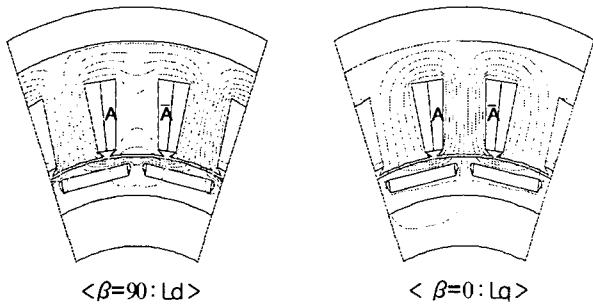
표 1. 모터 사양 비교

Table 1. Comparison of motor design parameter

구분		종래모델(블록형)	개선모델(아크형)
고정자 코어	코어, 슬롯수	분할코어, 24	분할코어, 24
	적층길이	24mm	25.5mm
	재질	S18	S18
고정자 권선	상저항	8.9 mΩ	10.0mΩ
	턴수, 직경	47턴, 1.3mm	47턴, 1.25mm
회전자 코어	적층길이	26 mm	30.5 mm
	재질	S18	S18
	외경	200mm	200mm
자석	자석형태	블록형(Block)	아크형(Arc)
	잔류자속밀도	1.05 T	1.05 T
	자기에너지	35MG	35MG



(a) A상을 d축 중심으로 모델링한 경우



(b) A상을 q축 중심으로 모델링한 경우

그림 8 비대칭적인 자기회로

Fig. 8 Non-symmetrical Magnetic Circuit

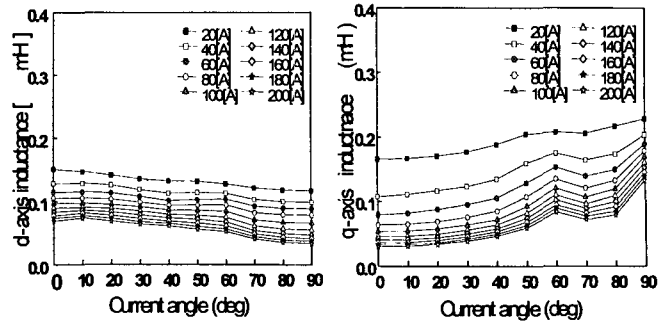


그림 9. 인덕턴스 특성

Fig. 9 d,q-axis inductance

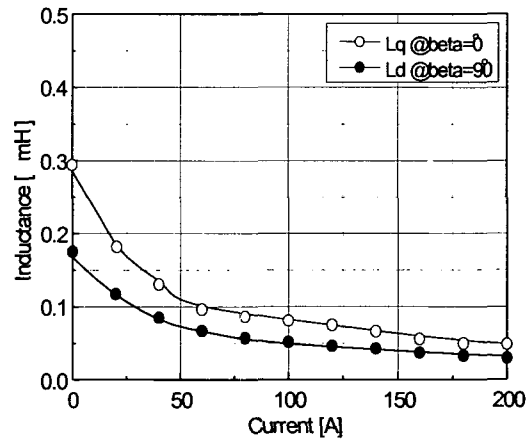


그림 10. 전류변화에 대한 인덕턴스

Fig. 10 Inductance according to current

4. 실험결과

해석의 타당성을 확인하기 위하여 대상 전동기의 공극자속밀도, 역기전력 및 전동기 운전특성에 대해 실험결과와 해석결과를 비교하였고, 종래의 전동기와도 개선내용에 대해서도 비교검토하였다. 공극자속밀도는 가우스 메타 및 저속으로 회전시키는 시험장치를 구성하여 측정하였으며 그림 11에 측정된 데이터와 해석결과를 표시하였다. 그림에서 보듯이 공극자속밀도는 해석결과와 유사한 수준인 0.9[T]로 측정되었으며 이는 종래의 전동기인 경우가 0.6[T]인 점을 고려하면 약 50% 정도 증대된 값으로써 이는 고정자와 회전자의 축방향길이가 다른데서 기인하는 프린징 효과, 자석형상이 블록형에서 아크형으로 변환에 따른 유효자속 증대가 주요요인으로 판단된다. 그림 12은 역기전력 파형을 블록형 타입의 전동기와 비교한 그림으로써 총 고조파 함유율이 25%에서 4.1%로 대폭 감소되어지고 역기전력의 크기도 약 1.65배 증대됨을 나타내고 있다. 이 같은 낮은 고조파 함유율은 정 토크정현파 전류제어 특성을 향상시켜 구동모터의 토크제어를 용이하게 한다. 그림에서 보이는바와 같이 역기전력이 완전하게 정현적이지 못한 것은 고정자 코어의 치상에 감겨있는 권선이 집중정렬권선을 사용함에 따른 것이다.

표2는 기저속도에서(1430rpm)의 역기전력의 총고조파함유량을 비교하고 있다.

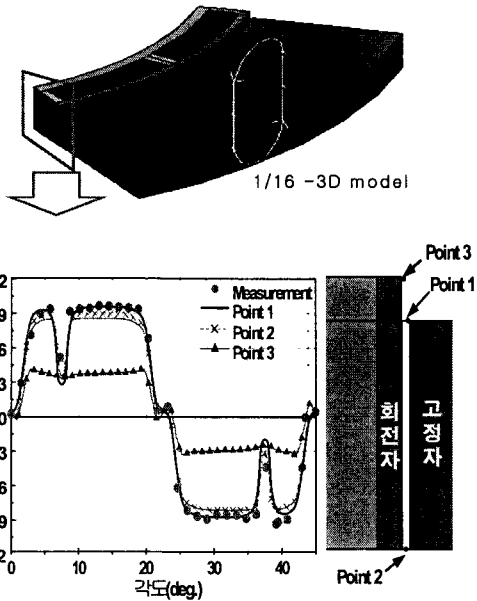
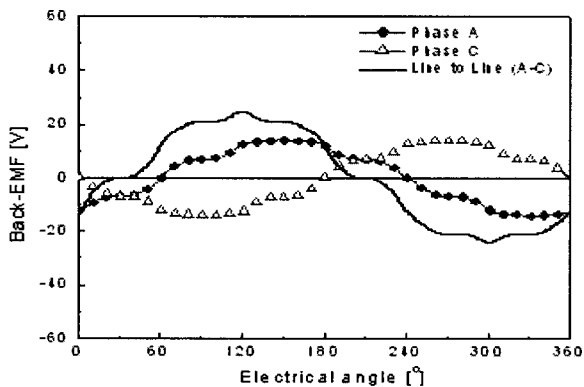
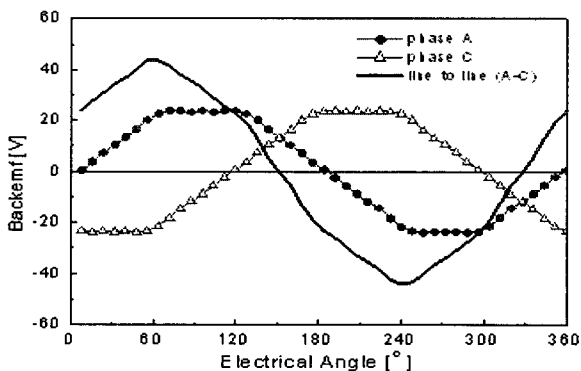


그림 11. 공극자속밀도
Fig 11. Air-gap flux density



(a) 블록형 자석구조



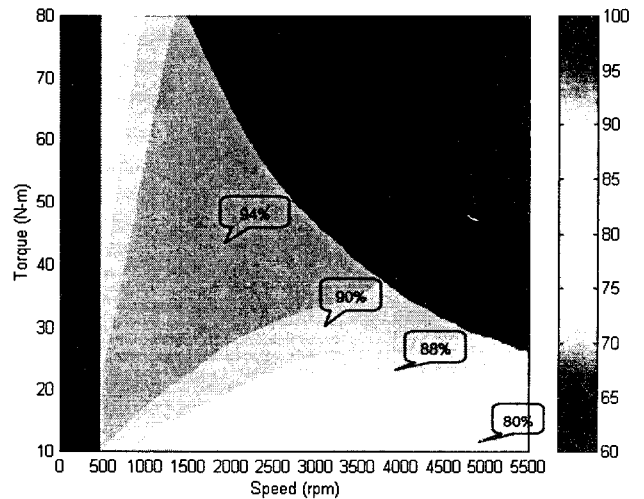
(b) Arc형 자석구조

그림 12 역기전력파형
Fig. 12. BEMF waveforms

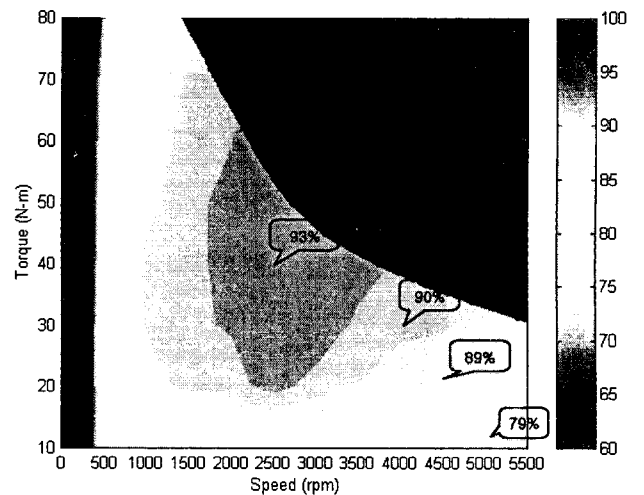
표 2 고조파(THD) 특성 비교
Table 2

rpm	구분	블록형 자석	아크형 자석
1430		25%	4.07%

그림 13는 아크형 영구자석을 갖는 IPMSM의 효율특성을 해석결과와 실험결과를 비교한 그림이다. 그림에서 알 수 있듯이 전동기의 고효율영역이 2000~3000rpm 부근에서 동작되고 있음을 알 수 있으며 이는 기존모델인 블록형인 경우 고효율 운전영역이 3000~4000rpm 것과 비교해보면 상당 부분 저속 영역으로 고효율점이 이동된 것을 알 수 있다.



(a)해석결과



(b)실험결과

그림 13 효율 맵
Fig. 13. Efficiency Map

5. 결론 및 고찰

매입형 영구자석 동기전동기는 자석에 의한 토크외에 릴럭턴스 토크를 이용하는 전동기이다. 따라서 본 연구에서는 각 부하상태에 따른 인덕턴스변화를 고찰하였고, 하이브리드 차량 구동용으로서 전동기 운전특성을 개선하는 방안, 즉 차량주행특성에 부합되는 저속영역에서 최고효율점운전이 되도록 역기전력을 크게 확보하고 또한 고조파함유를 감소시켜 정현파 역기전력파형을 발생시킴으로 차량의 전류 제어특성을 개선하였다. 이렇게 설계된 전동기는 블록형 자석배치의 기존모델에 비해 역기전력 1.65배, 고조파함유를 25%에서 4.1% 감소시켰으며, 전동기 최대효율 운전영역이 고회전수 영역인 3000~4000rpm부분에서 차량 주요 운전영역인 2000rpm으로 이동시켜 차량 연비향상에 기여할 수 있는 방안을 제시하였다.

참 고 문 헌

[1] G. Henneberger, G. Bailly, and J.R. adji-Minaglou, "Design and comparison of diereent motor types for electric vehicle application," in *EVS-11 Symposium Proceedings*, Florence, Italy, vol. 1, September 27-30, 1992,

[2] D.F. Gosden, "Wide speed range operation of an ac pm ev drive," in *EVS-11 Symposium Proceedings*, Florence, Italy, vol. 1, September 27-30 1992.

[3] J. Luomi, J. Lindstrom, and J. Hellsing, "Design and analysis of electrical motors for a hybrid electric vehicle," in *IEEE/Stockholm Power Tech Conference Proceedings*, Stockholm, Sweden, vol. Electrical Machines and Drives, pp. 274-279. June 18-22 1995,

[4] T. Sebastian and G.R. Slemon, "Operating limits of inverter-driven permanent magnet motor drives," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 23, no. 2, pp. 327-333, March 1987.

[5] R.F. Schiferl and T.A. Lipo, "Power capability of salient pole permanent magnet synchronous motors in variable speed drive applications," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. IA-26, no. 1, pp. 115-123, January 1990.

[6] W.L. Soong and T.J.E. Miller, "Field-weakening performance of brushless synchronous ac motor drives," *IEE Proc.-Electr. Power Appl.*, vol. 141, no. 6, pp. 331-340, November 1994.

[7] A. Hedman, "Transmission and vehicle simulation models for a hybrid electric vehicle," *Tech. Rep. R-96-01*, Sweden, May 1996.

[8] "Electric vehicle energy consumption and range test procedure," SAE Standard J1634, 1995.

[9] Gyu-Hong Kang, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim, Jung-Woo Park. "Improved parameters modelling of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor based on Finite Element Analysis", *IEEE Trans. on MAGNETICS*, vol. 36, no. 4, pp. 1867-1870, July 2000.

[10] 武田洋次, 松井信行, 森本茂雄, 本田幸夫, *埋込磁石同期モータの設計と制御*, オーム社, 2001.

[11] Frederick W. Grover, *Inductance calculations*, D. Van Nostrand Company, INC.,

저 자 소 개



김기남(金基男)

1962년 6월 5일생. 1986년 한양대 기계공학과 졸업. 1988년 동 대학원 기계공학과 졸업(공학석사), 2004년 동 대학원 기전공학과 박사과정. 1987~99년 만도중양연구소, 1999~2002 (주)삼코연구소, 2003~ 현재 현대자동차 연구소(선임연구원)
Tel : 031-368-7477, Fax : 031-368-7476
E-mail : knkim60@hyundai-motor.com



양해원(梁海元)

1950년 3월 20일생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1982년 일본 Kyoto대 전기공학과 졸업(공학박사). 1993년 미국 Yale대 방문교수. 1986년~현재 한양대학교 전자컴퓨터공학부 교수. 대한전기학회 부회장.
Tel : 031-400-5162, Fax : 031-406-7769
E-mail: hwyang@email.hanyang.ac.kr