

전기자동차용 매입형 영구자석 동기전동기의 전류제어기 특성 개선

박정우, 김종우, 구대현, *김흥근
한국전기연구소, 경북대학교

Improvement of Current Controller Characteristics of Interior Permanent Magnet Synchronous Motor for Electric Vehicle

Jung-Woo Park, Jong-Moo Kim, Dae-Hyun Ku, * Heung-Geun Kim
Korea Electrotechnology Research Institute, *Kyungpook National University

Abstract - Parameters of equivalent circuit of IPMSM are varied according to current magnitude and current phase angle. Especially, parameter variation of IPMSM for an electric vehicle(EV) is critical. Because current magnitude is very large, and current phase angle range also is wide. So, variation characteristics of L_d and L_q of the IPMSM are analyzed and verified through experiments. And then new parameter estimator of L_d and L_q that is constructed by neural network technique is suggested. Using numerical method, the advanced characteristics of current controller of vector control algorithm is verified.

1. 서 론

지구 온난화와 대기 보존법에 대응하기 위한 각 분야의 환경 친화적인 기술 개발이 요구되고 있는 국제적인 조류 속에서, 교통 및 수송 분야에서의 대처 방법 중 하나로써 매연이 발생하는 기존의 화석 연료를 대체하여 매연이 발생하지 않는 전기에너지 이용함으로써 환경 친화적인 수송시스템을 개발하여 기존 차량을 대체하고자 전기자동차에 대한 연구가 전세계적으로 추진 중에 있다. 특히, 미국에서 판매 차량의 일정 비율을 무공해 자동차가 차지하도록 하는 의무적인 강제 규제 안이 통과되면서 국내에서는 수출 전략 측면에서 더욱 주목을 받고 있다.

전기자동차에서의 핵심 기술은 주행거리 향상과 경량화로 요약되며, 전지 분야에서의 고효율밀도와 고에너지 밀도를 갖는 전지 개발과 더불어 전동기 분야에서는 고효율 밀도와 고효율 특성을 갖는 전동기 개발에 대한 연구가 국·내외적인 주요 연구 분야이다.

고효율과 고효율 밀도의 특성을 갖는 매입형 영구자석 동기 전동기(IPMSM)가 유도전동기 보다도 전기자동차의 전인 전동기로서 더욱 적합하다고 판단되며, 전동기 2대로 구동되는 독립 구동형 전기 자동차 용도로 IPMSM 전동기를 개발한 바 있다[1].

그런데 전기자동차 용도로 사용되는 전동기의 운전 조건은 부하 변동률이 매우 크고 정격전류가 크며 사용하는 속도 영역이 넓기 때문에 IPMSM 전동기의 등가 파라미터인 L_d , L_q 에서 변동이 크게 나타나는 특징을 갖게 된다. 이러한 현상 때문에 파라미터 변동을 고려하지 않고 벡터제어를 수행하게 되면 전류제어기 특성이 나빠지며 특정 속도 이상에서 속도 추종성이 깨어지는 심각한 문제점을 초래할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 기존의 방식과는 다르게 L_d 와 L_q 파라미터가 전류의 크기뿐만 아니라 전류 위상 각에 따라서 변동되는 특성을 분석[1]하고, 전류의 크기와 전류 위상 각에 따른 L_d 와 L_q 변동 곡선을 해석적인 방

법으로 구할 수 있었다. 그리고 특성 곡선을 이용하여, 신경 회로망 기법을 적용한 파라미터 추정기를 구성하여 전류제어기의 파라미터를 보정 해주는 개선된 벡터제어 방법을 제시하였다. 파라미터 변동에 대한 실험과 해석적인 방법을 통하여 향상된 전류 제어 특성을 보이고자 하였다.

2. 독립 구동형 전기자동차

2.1 시스템 특징

전동기 2대 구동형 전기자동차는 전동기 한 대로 구동되는 전기자동차와는 다르게 좌우 구동 바퀴에 전용의 전동기가 각각 구동을 담당하는 시스템으로, 독립적으로 좌우 구동륜을 제어를 할 수 있어 주행 특성을 개선시킬 수 있으며, 전동기 한 대로 구동되는 전기자동차에서 필요로 하였던 차동기어(Differential Gear)와 동력전달 요소(Axle)를 제거할 수 있기 때문에 차체를 경량화 시킬 수 있는 장점이 있다. 또한 대상 차에 대한 사양이 결정되면 요구되는 속도대 토크 사양을 2대의 전동기로 분담하기 때문에 상대적으로 소형 전동기로 추진시스템을 구축 할 수 있으며 궁극적으로 바퀴에 전동기를 내장하거나 부착하는 추진시스템 구축을 가능하게 하여 조립 구조화가 가능해지고, 전동기에 의한 무게중심을 낮게 분산시킬 수 있는 장점을 갖는다.

그림 1에 전동기, 감속기, 그리고 바퀴로 구성된 독립된 2개의 구동장치를 갖는 독립 구동형 전기자동차 사진을 나타내었다[1].



그림 1. 독립구동형 전기자동차

2.2 운전 특성

전기자동차의 운전 특성을 제어기에서 수용 가능 할 때 전기자동차 용도로의 우수한 인버터를 개발할 수 있으며 운전 특성과 이를 고려한 제어기 구성을 정리하면 다음과 같다.

첫째, 전기자동차는 기동시 가속 특성이 우수해야하고, 정토크 영역에서의 최대 전류는 정격전류의 2배에서 4 배까지 되는 큰 부하 변동률을 갖는 운전 특성을 나타낸다. 따라서 정토크 영역에서는 가속 능력을 최대한 발휘할 수 있도록 단위 전류당 최대 토크 제어 기법[2]이나 단위 위상각당 최대 토크 제어 기법을 적용하는 것이 고효율 제어나 역률 1제어 방

식 보다 유리하다.

둘째, 정출력 영역에서의 제어는 전기자동차에서 사용되는 구동전류가 매우 크기(200A 이상) 때문에 고정자 저항이 비록 작더라도(수십 mΩ) 고정자 저항 성분 때문에 생기는 전압 강하 성분(약 10 Volt 이상)을 무시할 수가 없다. 따라서 고정자 저항 성분에 의해서 생기는 전압 강하 성분을 고려한 약계자 제어가 적합하다.

셋째, 부하의 크기(전류 크기)에 따라 기저 속도가 크게 변동하는 특성때문에 기저속도가 변동 영역을 가질 수 있도록 전류제어 알고리즘을 구성하는 것이 적합하다.

넷째, 전동기를 제어하기 위하여 벡터 제어 알고리즘에서 사용하고 있는 L_d 와 L_q 파라미터는 기존의 논문에서 거의 고려하지 않았거나 전류의 크기에 의해서만 변동되는 것이 아니고, 전기자동차와 같이 가변속을 하면서 속도 범위가 넓은 경우(7000~12000 rpm)에서는 전류 위상각도 많이 변화하므로, L_d 와 L_q 에 대한 파라미터 변동을 전류의 크기 뿐만 아니라 전류 위상각의 함수로 동시에 고려해야 정확한 변동(파라미터 추정)을 반영할 수 있게 된다.

2.3 전동기 사양 및 등가파라미터

전동기 2대를 이용하는 독립 구동형 전기자동차 용도로 설계·제작한 매입형 영구자석 동기 전동기의 등가 파라미터[1]는 다음의 표1과 같다.

표1. IPMSM 파라미터

파라미터	기호	단위	값
영구자석에 의한 상당 역기전력	E_0	[V]	82.6
상당 역기전력	E	[V]	70.9
상 저항	R_a	[Ω]	0.0404
d축 리액턴스	X_d	[Ω]	0.42
q축 리액턴스	X_q	[Ω]	0.78
부하각	δ	[deg.]	40.7
전류 위상각	γ	[deg.]	22
역률 각	ψ	[deg.]	22.73
상 전류	I_a	[A]	85
합성 토크	T_{tot}	[N.m]	47.32
전자기적 토크	T_m	[N.m]	42
릴럭턴스 토크	T_R	[N.m]	5.1
최대 출력 (2080rpm)	P_{omax}	[kW]	49.3
최대 전류 (2080rpm)	I_{max}	[A]	300

3. 파라미터 변동을 고려한 벡터제어

3.1 L_d 와 L_q 변동 특성

L_d 와 L_q 파라미터는 전류의 크기(또는 i_q)와 전류 위상각에 따라 변동하는 특징을 나타내며, 일정한 부하 조건에서 사용되는 대부분의 경우에서처럼 파라미터 변동을 전류의 크기만의 함수로 처리하면 많은 오차를 갖게 됨을 알 수 있다. L_d 와 L_q 의 변동을 유한요소 방법을 이용하여 구한 결과를 그림2와 그림3에 정리하였다. L_q 파라미터는 부하의 크기와 전류 위상각에 따라 큰 범위로

변동한다는 것을 알 수 있으며, 벡터제어 알고리즘의 전류제어기에서 이를 고려하지 않으면 제어기 특성이 매우 좋지 않게 된다. 따라서 이러한 특성을 반영해 줄 수 있도록 파라미터 추정기를 사용하게 되면 부하변동과 전류 위상각의 변동에 대해 강인한 전류 제어기 특성을 갖도록 할 수 있다.

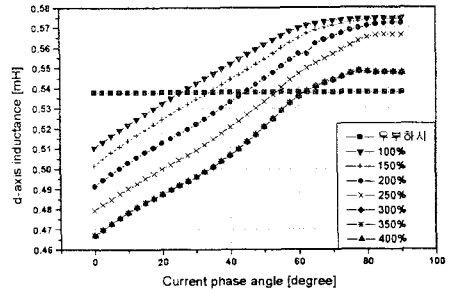


그림 2 전류 위상각에 따른 D축 인덕턴스의 변화

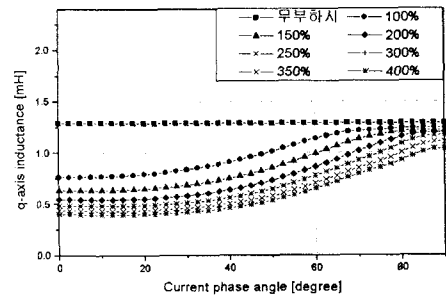


그림 3 전류 위상각에 따른 Q축 인덕턴스의 변화

3.2 신경 회로망을 이용한 파라미터 추정기

매입형 영구자석 동기 전동기의 d,q축 인덕턴스의 변화는 파라미터 변동 곡선으로부터 2 입력, 2출력 시스템으로 볼 수 있고, 비선형적인 특징을 가지고 있기 때문에 중간층을 한 개 두고 마디를 5개를 갖도록 신경 회로망을 구축하였다. 해석 단계에서 얻은 자료를 이용하여 학습을 수행한 후에 전향(Forward) 루틴만을 제어기에 붙여서 L_d 와 L_q 에 대한 파라미터 추정기를 구축

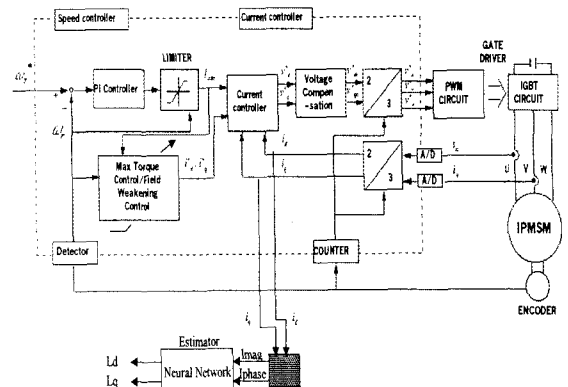


그림 4 신경회로망 추정기를 갖는 벡터제어 구성도

하였다. 신경 회로망을 이용한 L_d, L_q 추정기를 갖는 매입형 영 구자석 동기전동기용 벡터제어 알고리즘을 개념도로 나타내면 그림4와 같다.

4. 실험 결과

4.1 파라미터 변동 측정(무부하, 정격부하)

정격 부하 조건에서 실험한 L_d, L_q 파라미터와 수치 해석적으로 구한 값이 잘 맞고 있음을 실험으로 검증하였다.

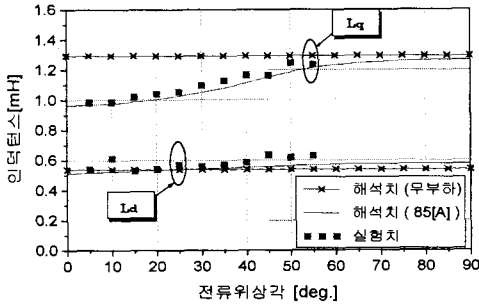


그림5. 전류크기와 전류 위상각에 따른 L_d, L_q 파라미터 변동 특성

4.2 전류제어기 특성 비교

IPMSM 전동기 플랜트와 벡터제어기를 구성한 후에, 신경회로망을 이용하여 추정한 L_d, L_q 파라미터를 플랜트에만 갱신시켜주고 제어기에는 상수로 제어를 수행한 (a)의 경우와, 제어기에서도 동시에 파라미터를 갱신하여 벡터제어를 수행하였을 때의 (b) 경우를 각각 비교하였다.

(a)의 경우에는 그림6의 좌측에서 보이는 바와 같이 속도 추종성이 깨어지는 특성을 나타내며 이때의 전류값을 그림7의 좌측에 나타내었다. 그림8의 좌측에서와 같이 L_d, L_q 파라미터는 부하조건과 전류 위상각 변동에 대해서 일정한 값을 유지할 때 나타나는 특성이다. (b)의 경우에는 임의의 부하조건(무부하에서 전부하조건)과 전 영역의 속도 범위에 대해서 강인한 전류제어 특성을 보이고 있다. 그림7의 우측에서 전류제어기의 향상된 특성을 보이고 있으며, 그림8의 우측에 부하조건과 전류 위상각의 변동에 따라 적정한 L_d, L_q 파라미터의 변동을 추정한 추정기 출력 값을 보이고 있다.

5. 결론

독립구동형 전기자동차 용도로 개발한 IPMSM 전동기와 시스템을 소개하고, 파라미터 변동에 따른 문제점 제거와 이에 대한 대처 방안을 제시하였다. 해석적으로 구한 L_d, L_q 파라미터 변동 특성을 신경회로망을 적용하여 추정기를 구축한 후 이를 전류제어기에서 사용되는 L_d, L_q 파라미터를 갱신시킴으로써 벡터제어 알고리즘의 전류제어기를 파라미터 변동과 전류 위상각의 변동에 대하여 강인한 특성을 갖도록 하였다. 실험적으로 파라미터 변동에 대한 검증을 하였으며 수치적인 방법을 이용하여 개선되는 전류제어기 특성을 검증하였다.

[참고 문헌]

- [1] 박정우, 구대현, 김중무, "전기자동차용 바퀴일체형 전동기 및 제어기 개발", 산업자원부, 1998.
- [2] Shigeo Morimoto, Yoji Takeda, "Expansion of Operating Limits for Permanent Magnet Motor by

Current Vector Control Considering Inverter Capacity", IEEE Trans. on Industry Appl., Vol.26, No.5, PP.866~871, 1990.

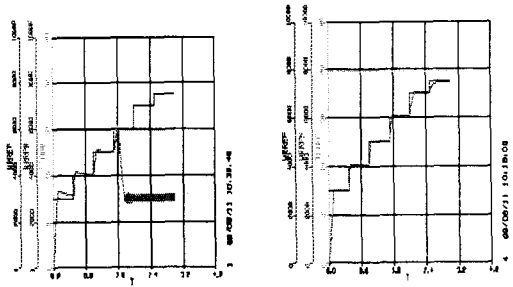


그림 6. 속도 추종 특성 (a)신경회로망 추정기 미적용 (b)신경회로망 추정기 적용

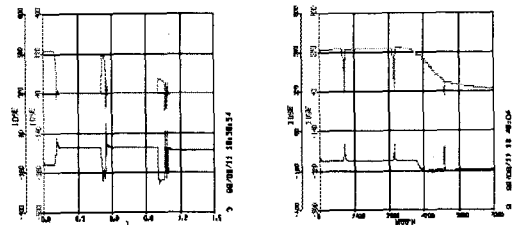


그림 7. 전류제어기 특성 (a)신경회로망 추정기 미적용 (b)신경회로망 추정기 적용

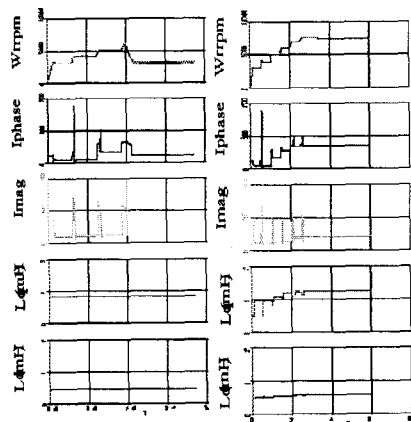


그림 8. L_d, L_q 파라미터 특성 (rpm, Iphase, Imag, Lq, Ld) (a)신경회로망 추정기 미적용 (b)신경회로망 추정기 적용