

Characteristics Analysis of Motor According to Rotor Type Considering Magnetic Nonlinearity of Permanent Magnet

Min-Ro Park¹ and Kap-Ho Seo^{1,2,3}

¹Interactive Robotics R&D Division, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence, Pohang 37553, Korea

²Department of Mechanical Engineering, Pohang University of Science and Technology (POSTECH), Pohang 37673, Korea

³Department of Robot and Smart System Engineering, Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

Sung-Woo Hwang and Myung-Seop Lim*

Department of Automotive Engineering, Hanyang University, Seoul 04763, Korea

(Received 16 June 2021, Received in final form 25 June 2021, Accepted 25 June 2021)

The permanent magnet is an important component that determines the performance and cost of a synchronous motor. Also, the characteristic of the permanent magnet is a major factor in determining the performance of the electric motor. Therefore, to improve the performance of the permanent magnet synchronous motor and reduce the material cost, the permanent magnets having various characteristics are being developed. However, the magnetic properties of permanent magnets have nonlinearity. Therefore, this paper proposes a method to calculate the operating point of a permanent magnet by considering not only the nonlinear magnetic properties of the electrical steel sheet but also the nonlinear properties of the permanent magnet and analyze the characteristics of the electric motor based on this proposed method. Through this, the characteristics of the permanent magnet synchronous motor are analyzed according to the rotor type and the design direction for each type is suggested.

Keywords : permanent magnet, operating point, synchronous motor, nonlinearity, demagnetization characteristics

영구자석 비선형 자기특성을 고려한 회전자 타입에 따른 모터 특성 분석

박민로¹ · 서갑호^{1,2,3}

¹한국로봇융합연구원 인터랙티브로봇연구본부, 경북 포항시 해안로 1106번길, 37553

²포항공과대학교 기계공학과, 경북 포항시 청암로 77, 37673

³경북대학교 로봇및스마트시스템공학과, 대구 북구 대학로 80, 41566

황성우 · 임명섭*

한양대학교 미래자동차공학과, 서울 성동구 왕십리로 222, 04763

(2021년 6월 16일 받음, 2021년 6월 25일 최종수정본 받음, 2021년 6월 25일 게재확정)

영구자석은 모터의 중요한 구성요소로서 영구자석 고유의 특성이 모터의 성능과 비용 결정하는 주요 요인이 되고 있다. 따라서, 영구자석 동기 모터에서는 성능 향상과 재료비 저감을 위해 높은 잔류 자속밀도와 보자력을 가진 영구자석이 개발되고 있다. 하지만, 영구자석의 자기적 특성은 비선형성을 가진다. 따라서, 본 논문에서는 영구자석과 전기강판의 비선형 자기특성을 동시에 고려한 영구자석의 동작점을 계산하는 방법을 제안한다. 또한, 이를 기반으로 회전자 극 수(6, 8, 10극)와 타입(매입자석형, 자속집중형)에 따른 영구자석 동기 모터의 역기전력과 감자특성을 분석한다. 이를 통해, 영구자석 동기 모터의 설계 방향을 제시한다.

주제어 : 영구자석, 동작점, 동기 모터, 비선형성, 감자 특성

I. 서 론

영구자석 동기 모터(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 높은 단위 체적당 출력 및 효율로 인해 오랫동안 널리 사용되고 연구되어 왔다[1,2]. 특히 소결 NdFeB PM을 사용하여 고효율, 고출력 그리고 경량화를 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다[3]. 그러나 대부분의 소결 NdFeB PM에는 디스프로슘(Dy)과 같은 희토류 원소가 포함된다. 따라서 PMSM의 제조원가를 줄이기 위해 Dy를 최소화하기 위한 연구들이 수행되었다. 대표적으로, Aichi Steel Corporation에서 Dy free 이방성 NdFeB PM이 개발되었다[4]. 이는 ferrite PM에 비해 높은 성능을 가지고, 가격 변동에 대한 대응과 원재료 수급에 효율적이다 [5]. 그러나 Fig. 1과 같이, 새로 개발되는 PM들을 포함한 NdFeB PM들은 비선형 자기 특성을 보여준다. 특히, 이방성 본드 NdFeB PM은 모든 온도 범위에서 비선형 특성이 나타난다.

따라서, PM의 비선형 자기 특성을 고려한 동작점을 계산하기 위한 연구들이 발표되었다[6]. 제시된 방법들은 PM의 동작점을 추정하기 위해 PM의 감자특성을 두 직선으로 근사화 하였다. 그러나 이 방법은 기울기가 급격히 변하는 무릎점 부근에서 동작점이 결정되거나, 전영역 비선형 특성인 본

드 NdFeB PM의 경우, 정확한 동작점 계산에 한계가 있다.

이러한 한계를 극복하기 위하여, 본 논문에서는 PM의 비선형 자기 특성을 고려하여 동작점을 결정하는 방법을 제안한다. 이때, PMSM에 사용된 전기강판의 비선형 자기 특성까지 함께 고려한다. 그리고 제안한 방법을 이용하여, 회전자 타입에 따른 매입 자석형 PMSM의 특성을 분석하였다.

II. 영구자석 동작점 계산

Fig. 2는 본 논문에서 제안한 비선형 자기 특성을 고려한 동작점 계산 과정을 보여준다. Fig. 2에서 B_r 은 잔류 자속밀도, H_m 및 B_m 은 FEA로부터 계산된 동작점이다. H_m^{curve} 와 B_m^{curve} 는 제조사로부터 제공된 PM의 재료 특성으로부터 결정되는 동작점이다. μ_{rec} 는 PM의 recoil permeability이다. PM의 비선형 특성을 고려하지 않은 경우, 동작점 계산을 위한 PM의 자기 특성은 선형으로 가정한다. 동작점은 초기 입력된 B_r 과 μ_{rec} 를 사용하여 계산된다. 이 경우 Fig. 3의 (a)에서 보여주듯이, 동작점이 무릎점 아래에 있을 때 발생하는 불가역 감자 현상을 고려할 수 없다. 그러나 PM의 비선형 특성을 고려한 경우, 요소 별 동작점에 따라 B_r 이 다르게 결정되어 불가역 감자 현상을 고려할 수 있다. 제안하는 동작점

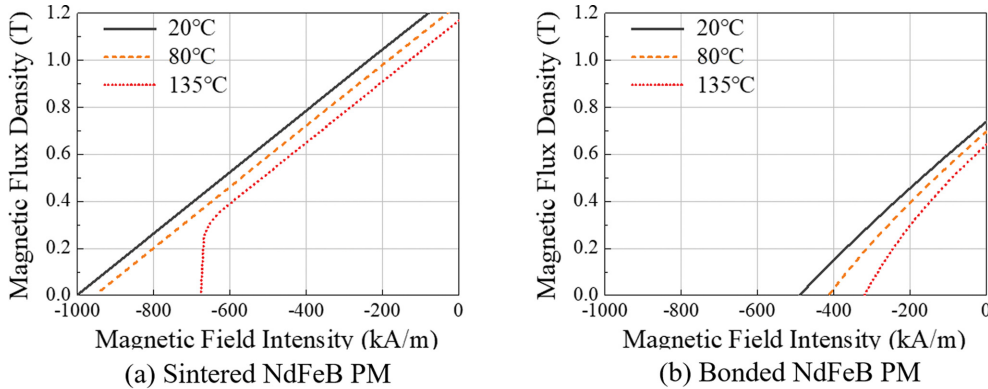


Fig. 1. (Color online) Nonlinear property of PM.

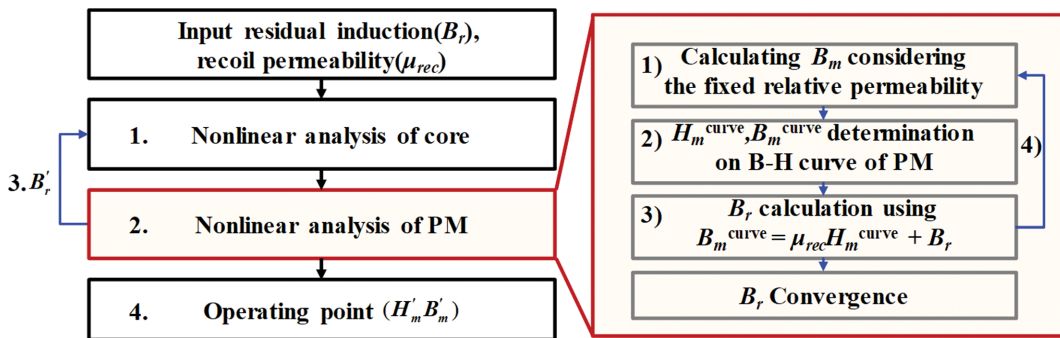


Fig. 2. (Color online) Operating point calculation process.

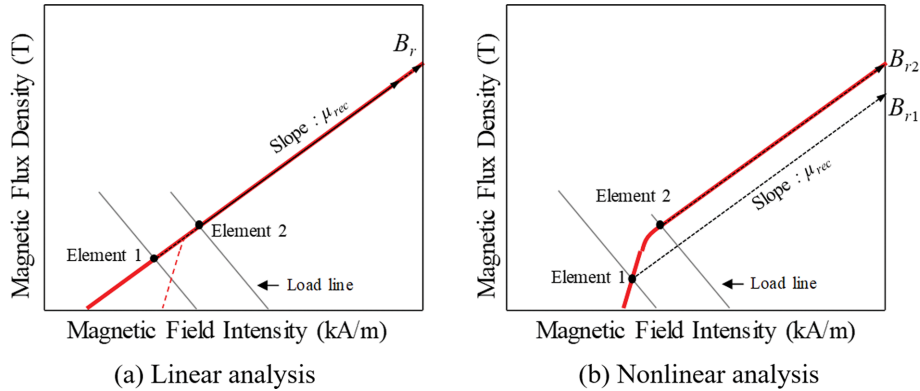


Fig. 3. (Color online) Comparison according to analysis methods of PM.

계산 과정에 대한 설명은 다음과 같다.

1. 초기 B_r , recoil permeability를 이용해 철심의 비선형 해석을 수행하고, 철심의 relative permeability를 고정한다.
2. PM의 비선형 해석을 통해, 새로운 잔류 자속밀도, B_r 를 계산한다.
3. 갱신된 B_r 를 이용하여 철심의 비선형 해석을 다시 수행한다.
4. 철심의 relative permeability와 PM의 B_r 이 수렴할 때까지 반복한다.

이때, PM의 비선형 해석 과정은 Fig. 4와 같으며, 설명은 다음과 같다.

- 1) B_m 은 앞서 계산된 철심의 relative permeability를 고려하여 계산된다.
- 2) B_m 을 사용하여 H_m^{curve} , B_m^{curve} 을 결정한다.
- 3) 결정된 H_m^{curve} , B_m^{curve} 과 recoil permeability를 통해 새로운 B_r 이 계산된다.
- 4) B_r 이 수렴할 때까지, 새로운 B_r 을 이용하여 1)에서 3) 단계를 반복한다.

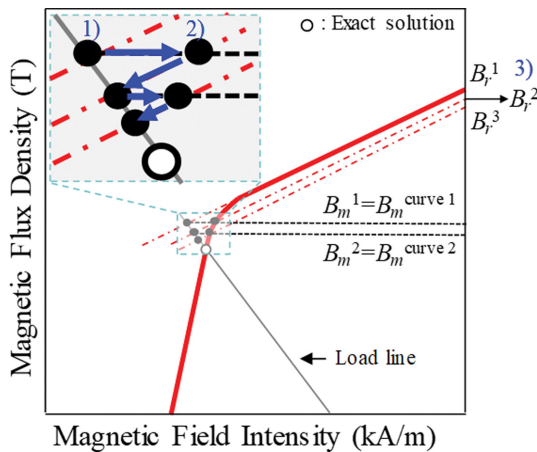


Fig. 4. (Color online) Nonlinear analysis of PM.

이 과정은 2D 자계 FEA를 통해 모터의 각 요소에 적용되고, PM과 철심의 비선형 특성을 동시에 반영하여 정확한 동작점을 계산하기 때문에 PMSM 설계 시, 다양한 조건에 따른 PM의 특성을 정확하게 계산할 수 있다.

III. 회전자 타입에 따른 모터 특성

2절에서 제안한 비선형 해석 방법을 이용하여, 회전자 타입에 따른 매입자석 PMSM의 특성에 대해 분석한다. Fig. 5과 같이 4가지 타입과 3가지 다른 극 수에 대한 동작점을 계산했으며, 무부하 역기전력(Electro-magnetic force, EMF), 전 고조파 왜율(Total harmonic distortion, THD), PM 사용량 당 무부하 역기전력, 그리고 PM의 감자특성을 평가하였다.

1. 무부하 역기전력

Fig. 6은 회전자 타입과 극 수에 따른 무부하 역기전력의 차이를 보여준다. IPM 타입을 제외한 모든 타입에서 극 수가 증가함에 따라 PM 사용량이 증가하여 무부하 역기전력이 증가한다. 그리고 IPM V 타입이 비교적 낮은 THD와 함께 가장 높은 무부하 역기전력을 보여준다. 자속집중형과 자속집중형 V 타입은 IPM, IPM V 타입보다 THD가 높지만, PM 사용량 당 무부하 역기전력은 높게 나타난다. 이유는 IPM, IPM V 타입에서는 철심 rib에서의 누설자속으로 인하여 쇄교자속이 감소했기 때문이다. 그리고 극 수가 증가함에 따라 회전자가 포화되어 PM 사용량 당 역기전력이 감소한다.

2. 영구자석 감자 특성

제안된 해석 방법을 이용하여, 전류 인가 전후에 따른 감자특성을 평가하였다[7]. Fig. 7은 회전자 타입에 따른 결과를 보여준다. 먼저, 극 수가 증가함에 따라 모든 타입에서 감자 특성에 강인한 결과를 보여준다. 이는 극 수가 증가함에 따라 극당 전자기 반작용 자계가 감소했기 때문이다. 또한,

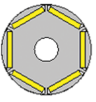

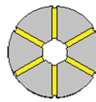
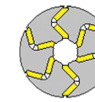
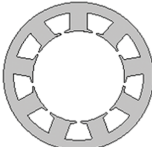
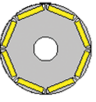

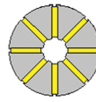

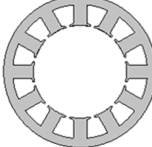
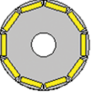

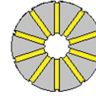
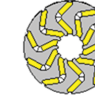
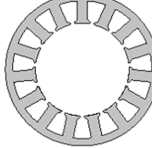
Pole-Slot Combination	Type	Rotor				Stator
		IPM		Flux concentrated		
	Bar type	V type	Bar type	V type		
6 poles 9 slots						
8 poles 12 slots						
10 poles 15 slots						

Fig. 5. (Color online) Analysis models according to rotor type.

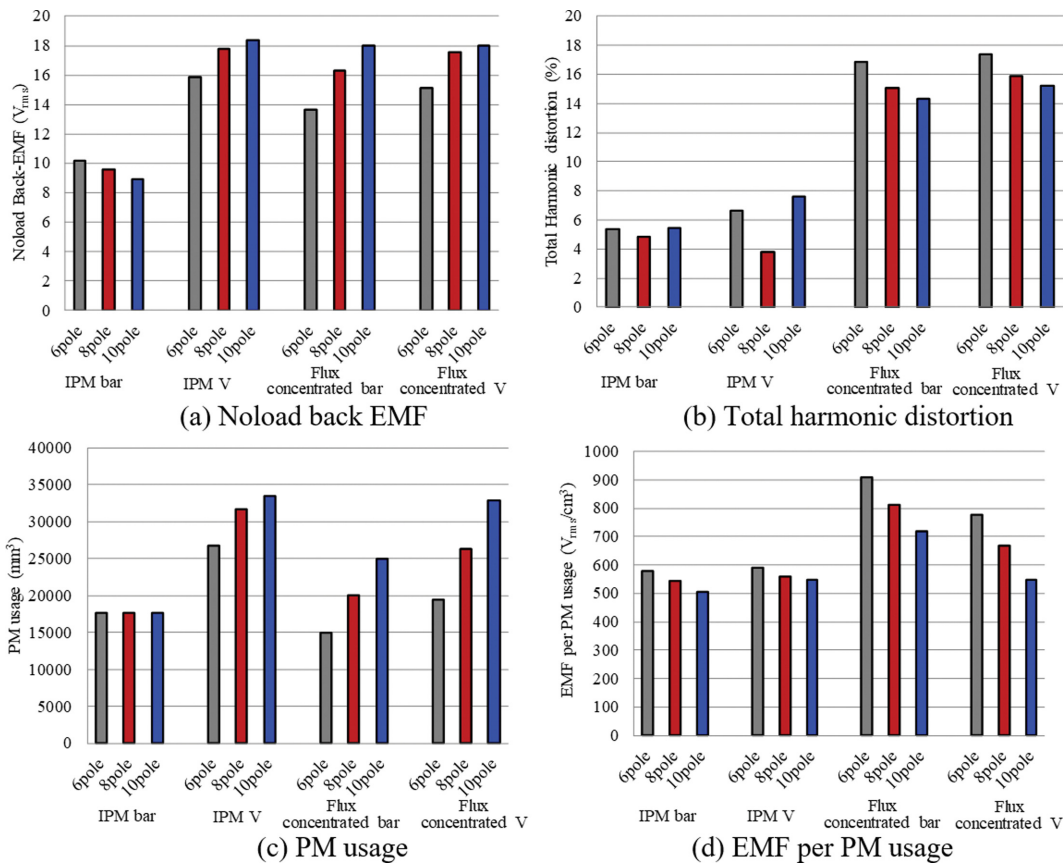


Fig. 6. (Color online) No-load EMF characteristics for each type.

자속집중형과 집중자속형 V 타입은 IPM, IPM V 타입과 비교하여, 감자 특성이 떨어진다. IPM과 IPM V 타입은 전기

자 반작용에 의한 전기자 자속이 rib에서 누설되어 PM에 가해지는 전기자 기자력이 감소했기 때문이다.

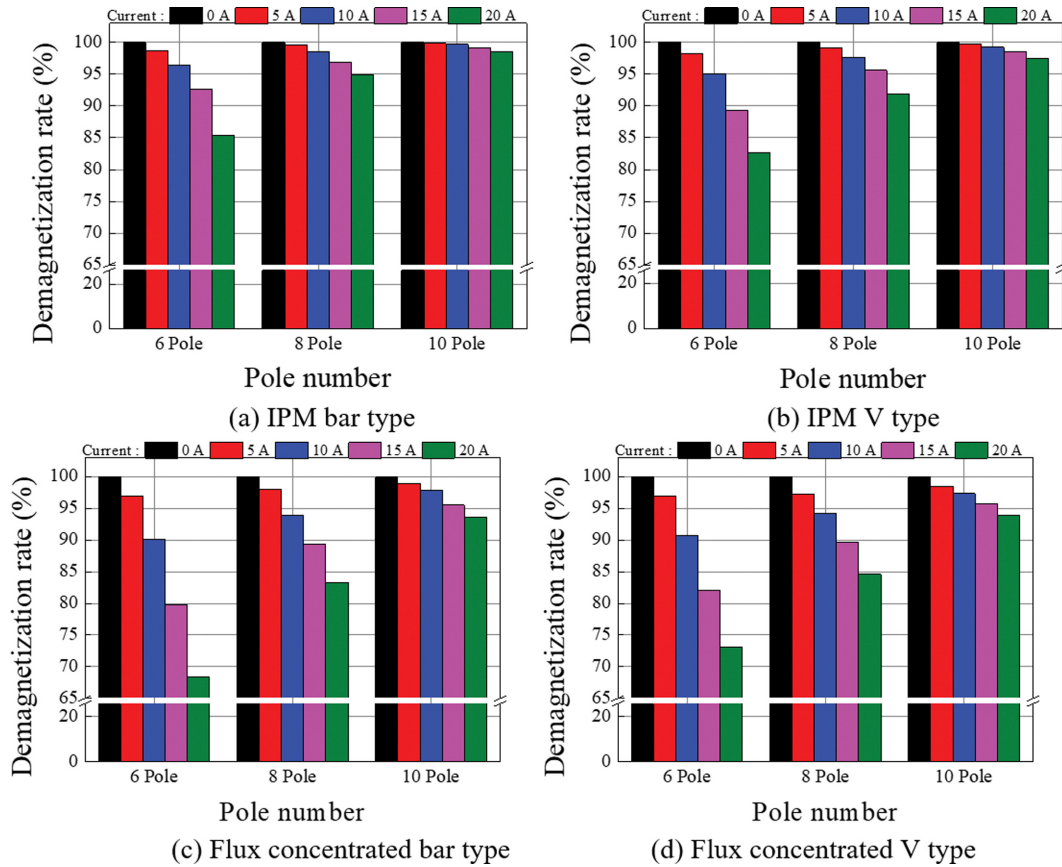


Fig. 7. (Color online) Demagnetization characteristics for each type.

IV. 결 론

PM과 전기강판은 PMSM에서 중요한 구성요소이다. 따라서, PMSM의 성능을 향상시키기 위해서, PM과 전기강판의 비선형 특성을 반영한 PMSM의 정확한 해석이 필요하다. 또한, 이를 통해 PM과 전기강판의 사용량을 최소화하여 재료 비용을 저감할 수 있다. 이러한 이유로, 본 논문에서는 PM과 전기강판의 결합된 비선형 해석 방법을 제안하고, 제안한 방법의 필요성을 강조하기 위해 선형, 비선형 해석 시, PM의 동작점을 비교하였다. 그 결과, PM의 비선형 특성이 저온에 비하여 커지는 고온에서, 그리고 부하 시에 비선형 해석을 할 경우에 동작점의 차이가 크게 나타났다. 또한, 이 방법은 2D 자체 FEA에 적용하여, 회전자 타입과 극 수에 따른 무부하 역기전력, THD, PM 사용량 당 무부하 역기전력 및 감자 특성을 비교하였다. 이러한 분석을 통해 PMSM의 설계 시에 PM 비선형 특성을 고려하여 회전자 타입에 따른 설계 방향을 결정할 수 있을 것으로 판단된다. 또한, PM의 불가역 감자 현상으로 인한 PMSM의 성능 저하를 정확하게 평가하고, 불가역 감자 현상을 방지하기 위한 보다 정확한 설계가 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 산업통상자원부 ‘산업전문인력역량강화사업’의 재원으로 한국산업기술진흥원(KIAT)의 지원을 받아 수행된 연구임(2021년 미래형자동차 R&D 전문인력 양성사업, 과제 번호: N0002428).

References

- [1] S. J. Lee, K. S. Kim, S. G. Cho, J. Y. Jang, T. H. Lee, and J. P. Hong, IET Electric Power Applications **8**, 23 (2014).
- [2] H. J. Kim, D. Y. Kim, and J. P. Hong, IEEE Trans. Magn. **50**, 1 (2014).
- [3] H. J. Kim, C. S. Koh, and P. S. Shin, IEEE Trans. Magn. **46**, 2314 (2010).
- [4] N. Hamada, C. Mishima, H. Mitarai, and Y. Honkura, IEEE Trans. Magn. **39**, 2953 (2003).
- [5] Y. Hayashi, H. Mitarai, and Y. Honkura, IEEE Trans. Magn. **39**, 2893 (2003).
- [6] Y. S. Lee, K. T. Kim, and J. Hur, IEEE Trans. Magn. **50**, 889 (2014).
- [7] Y. H. Jung, M. R. Park, K. O. Kim, J. W. Chin, and M. S. Lim, IEEE Trans. Ind. Appl. **57**, 327 (2021).