

Phase-field 모델을 이용한 매입형 영구자석 모터 고정자의 토크리플 저감 최적설계

임성훈^{*1)} · 민승재²⁾ · 홍정표²⁾

한양대학교 대학원 자동차공학과¹⁾ · 한양대학교 기계공학부/자동차공학과²⁾

Optimal Stator Design of Interior Permanent Magnet Motor for Torque Ripple Reduction using Phase-field Model

Sunghoon Lim^{*1)} · Seungjae Min²⁾ · Jung-Pyo Hong²⁾

^{*1)} Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Sungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

²⁾ School of Mechanical Engineering/Department of Automotive Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Sungdong-gu, Seoul 133-791, Korea

Abstract : This paper presents a new design optimization method that is applicable to design of interior permanent magnet(IPM) motor for torque ripple reduction. To control the complexity of optimal design and increase the productivity, phase-field model is introduced in optimization problem. In order to validate the proposed method, the stator part of a IPM motor which is developed for a power source of hybrid vehicle is optimized by different coefficient of complexity τ .

Key words : Design optimization(최적설계), Phase-field model(Phase-field 모델), Interior permanent magnet motor(매입형 영구자석 모터), Torque ripple(토크리플)

1. 서 론

하이브리드 및 전기자동차의 동력원으로 사용되고 있는 매입형 영구자석 모터는 회전자의 자기 저항 변화에 의해 발생하는 릴럭턴스 토크를 이용하기 때문에 다른 방식의 모터에 비해 크기 대비 효율이 높은 반면 소음과 진동의 원인인 토크리플이 크다는 단점이 있다. 따라서 모터의 형상을 최적화하여 토크리플을 줄이기 위한 많은 연구¹⁾⁻³⁾가 수행되어 왔으며 특히 Kwack 등⁴⁾은 레벨셋법을 이용한 최적설계 기법을 통해 토크리플을 크게 감소시킬 수 있는 고정자의 명확한 형상을 제안한 바 있다. 그러나 복잡한 경계로 구성된 최적 형상

은 실제 설계에 반영하기가 어렵기 때문에 생산하기 쉽도록 단순한 형태를 도출할 수 있는 모터 설계 기법의 개발이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 phase-field 모델⁵⁾을 모터 설계에 도입하여 설계자가 최적 형상의 복잡도를 조절할 수 있는 새로운 기법을 제안하였고 이를 이용하여 토크리플을 최소화하는 고정자의 최적 형상을 도출하였다.

2. 문제 정식화

2.1 Phase-field 모델

모터 고정자의 형상($\partial\Omega$)을 표현하기 위해 설계영역(Ω) 내에서 레벨셋 함수를 아래와 같이 설정하여 재료 영역(Ω^+)과 비재료 영역(Ω^-)을 구분하였다.

* 임성훈, E-mail: sleeplim@hotmail.com.

$$\begin{cases} 0 < \phi(\mathbf{x}) \leq 1 & \mathbf{x} \in \Omega^+ \\ \phi(\mathbf{x}) = 0 & \mathbf{x} \in \partial\Omega \\ -1 \leq \phi(\mathbf{x}) < 0 & \mathbf{x} \in \Omega^- \end{cases}$$

또한, 헤비사이드 함수를 이용하면 각 영역의 물성값을 나타낼 수 있는데, 본 연구에서는 강자성 물질의 최적 분포를 찾기 위하여 다음과 같이 자기저항률을 물성값으로 사용하였다.

$$v(\phi(\mathbf{x})) = v_0 \left((v_{ferro} - v_{air}) H(\phi(\mathbf{x})) + v_{air} \right) \quad (2)$$

여기서 v_0 는 절대 자기저항률, v_{ferro} 와 v_{air} 는 각각 강자성 재료와 공기의 자기저항률을 의미한다.

Phase-field 모델에서는 각 영역의 레벨셋 함수를 상한과 하한으로 고정시키기 때문에 레벨셋 함수 값이 변화하는 경계 영역이 존재하게 되는데, 레벨셋 함수의 구배를 이용하면 아래와 같이 경계 영역에서만 값을 가지는 가상의 에너지를 정의할 수 있다.

$$\int_{\Omega} \frac{|\nabla \phi|^2}{2} d\Omega \quad (3)$$

2.2 정식화

토크리플을 저감할 수 있는 고정자의 최적설계를 수행하기 위해 Kwack 등⁴⁾이 제안한 목적 함수를 사용하였다. 단, 생산성을 고려한 설계를 위하여 식 (3)에서 정의된 경계 에너지를 목적 범함수에 포함시켜 최종 형상의 복잡도를 조절할 수 있도록 아래와 같이 정식화하였다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{i=1}^p \left(\frac{T_i}{T_0} - 1 \right)^2 + \tau \int_{\Omega} \frac{|\nabla \phi|^2}{2} d\Omega \quad (4)$$

$$\text{Subject to } g = \int_{\Omega} H(\phi(\mathbf{x})) d\Omega \leq V_0$$

여기서 T_0 와 V_0 는 각각 목표 토크와 재료량, p 는 회전자 위치의 수, 그리고 T_i 는 각 위치에서의 토크를 의미한다. 또한 τ 는 최종 형상의 복잡한 정도를 조절할 수 있는 계수이다.

또한, 최적형상의 성능을 판단할 수 있는 토크리플은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다.

$$\left(\frac{T_{\max} - T_{\min}}{T_{\max} + T_{\min}} \right) \times 100 \quad [\%] \quad (5)$$

3. 고정자 설계 결과

제안한 최적화 기법을 하이브리드 자동차의 구동용 모터로 개발된 20kW급 12극 18슬롯 매입형 영구자석 모터의 설계에 적용하였는데 초기 모델의 평균토크는 58.2Nm, 토크리플은 91.3%이다. 설계 영역은 Fig. 1과 같고 목표 토크는 65Nm, 강자성 물질 사용량은 설계 영역의 80%로 설정하여 최적화를 수행하였다.

Fig. 2 (a)는 복잡도 계수를 0으로 설정하여 생산성을 고려하지 않은 최적 형상이다. 고정자의 가장자리에서 강자성 물질이 제거되는 현상을 확인할 수 있는데 이는 인근 고정자 치로 누설되는 자속을 감소시켜 평균토크를 증가시키는 효과가 있다. 또한 고정자 하단에 생기는 노치 형상은 자기 포화 현상을 촉진시켜 고정자 가장자리로 집중되는 자속의 흐름을 고정자의 중앙부분으로 바꾸어 주는 역할을 하고 불균형한 자속의 분포를 방지하기 때문에 토크리플이 감소하게 된다. 따라서 Fig. 3과 같이 초기 형상과 비교하여 평균값은 65.8Nm로 13.1% 증가하는 동시에 리플성분은 9.6%로 89.5% 감소하는 토크 성능을 확인할 수 있었다. 그러나 최적 형상의 경계가 매우 복잡한 곡선으로 구성되어 있어 실제 모터 제작에 반영하기는 쉽지 않다.

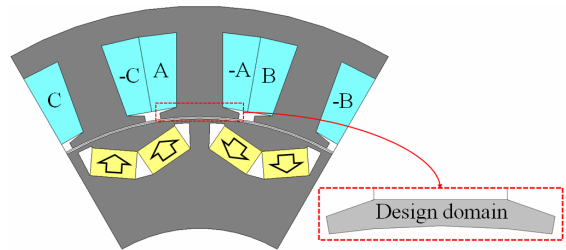


Fig. 1 Reference model and design domain

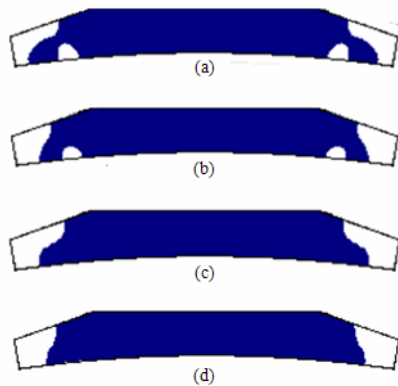


Fig. 2 Optimal stator design according to: (a) $\tau=0$ (b) $\tau=1 \times 10^{-8}$ (c) $\tau=5 \times 10^{-8}$ (d) $\tau=1 \times 10^{-7}$

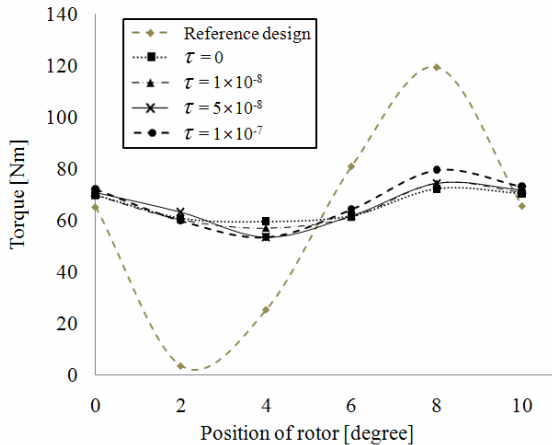


Fig. 3 Torque curve for each τ

Table 1 Result comparison

	Reference design	Optimal design			
		$\tau = 0$	$\tau = 1 \times 10^{-8}$	$\tau = 5 \times 10^{-8}$	$\tau = 1 \times 10^{-7}$
Average torque [Nm]	58.2	65.8	65.6	65.9	66.9
		13.1%↑	12.7%↑	13.2%↑	14.9%↑
Torque ripple [%]	91.3	9.6	13.2	16.3	18.5
		89.5%↓	85.5%↓	82.1%↓	79.7%↓

따라서 모터의 생산성을 고려하기 위해 형상의 복잡도를 조절하여 보다 단순한 형태의 고정자를 설계하도록 최적화를 수행하였다. Fig. 2와 같이 복잡도 계수가 증가하면 목적 범함수 내에서 경계 에너지의 비중이 커지게 되어 경계를 단순화하는 방향으로 최적화가 진행된다. Table 1의 결과에서 복잡도 계수가 증가할수록 토크리플은 조금씩 증가하는 사실을 확인할 수 있지만, 경계는 더 단순해지기 때문에 생산성은 높아진다. 특히 가장 단순한 형상으로 최적설계된 Fig. 2 (d)의 경우에도 평균토크가 14.9% 증가하고 토크리플이 79.7% 감소하여 모터 성능은 크게 향상된다는 사실을 확인하였다.

4. 결론

생산성을 고려한 모터 설계를 위해 phase-field 모델을 이용한 최적설계를 수행하였고 토크리플을

줄이기 위한 IPM 모터 고정자 설계에 적용하였다. 그 결과 경계는 단순하지만 평균 토크를 증가시키는 동시에 토크리플을 크게 감소시킬 수 있는 고정자의 형상을 최적화할 수 있었다. 가상의 경계 에너지를 최적 설계 과정에 도입함으로써 형상의 복잡도를 조절할 수 있었고, 제안한 설계 기법을 복잡한 형상을 갖는 자기 액추에이터의 설계에 적용하면 생산성까지 고려한 최적설계가 가능하다는 사실을 확인하였다.

References

- 1) M. Sanada, K. Hiramoto, S. Morimoto and Y. Takeda, "Torque Ripple Improvement for Synchronous Reluctance Motor using an Asymmetric Flux Barrier Arrangement", IEEE Trans. Ind. Appl., 40, 4, 1076-1082, 2004
- 2) S.-I. Kim, J.-Y. Lee, Y.-K. Kim, J.-P. Hong, Y. Hur and Y.-H. Jung, "Optimization for reduction of torque ripple in interior permanent magnet motor by using the Taguchi method", Magnetics, IEEE Transactions on, 41, 5, 1796-1799, 2005
- 3) A. Kioumars, M. Moallem and B. Fahimi, "Mitigation of Torque Ripple in Interior Permanent Magnet Motor by Optimal Shape Design", Magnetics, IEEE Transactions on, 42, 11, 3706-3711, 2006
- 4) J. Kwack, S. Min and J.-P. Hong, "Optimal Stator Design of Interior Permanent Magnet Motor to Reduce Torque Ripple Using the Level Set Method", Magnetics, IEEE Transactions on, 46, 6, 2108-2111, 2010
- 5) J. W. Cahn and J. E. Hilliard, "Free Energy of a Nonuniform System. I. Interfacial Free Energy", J. Chem. Phys., 28, 2, 258-267, 1958