

자기적 평형에 기초한 단상 LSPM 전동기의 정동특성과 기동특성을 고려한 실용적인 설계방법

백수황*, 김병택**, 권병일*
한양대학교*, 군산대학교**

A Practical Design Methodology Considering Maximum and Starting Characteristics of a Single-phase Line Start PM Motor Based on Magnetic Balance

Soo-whang Baek*, Byung-taek Kim** and Byung-il Kwon*
Hanyang University*, Kunsan National University**

Abstract - 본 논문은 평형운전조건 및 고정자 동손 최소화조건이 적용된 단상 LSPM 전동기를 기본모델로 하며 이를 기초로 기동특성 및 정동특성을 고려한 최적설계 방법을 제안한다. 기동특성 및 정동특성을 고려한 설계 변수로는 회전자 도체의 형상과 엔드링의 축방향 길이를 선정 하였으며 이를 통하여 평형운전조건과 고정자 동손최소화 조건을 만족하는 동시에 기동특성 및 정동특성을 고려한 최적모델을 설계하였다. 또한 최적설계 과정을 통하여 얻은 특성들을 유한요소해석을 통해 비교 및 분석하였으며 본 논문에서 제안하는 실용적인 최적설계 방법의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

단상 LSPM 전동기는 동기속도로 운전되는 동기전동기의 특성을 갖는다. 단상전동기의 구조적 특성상 고정자 권선의 배치는 비대칭적인 구조를 갖고 있으며, 이 때 대칭자계에 기초한 해석적 측면에서 바라보았을 때 고정자의 주-보조권선에서 발생하는 불평형자계로 인하여 역상분 요소가 존재하게 된다. 이는 정상상태 운전시의 토크리플의 원인이 되며 회전자의 알루미늄 도체와 영구자석에서의 와전류 손실을 발생시켜 효율을 저하시키는 문제점이 있다. 그러므로 불평형자계로 인하여 발생하는 역상분요소를 제거하기 위해서 등가회로를 기반으로 하는 대칭자계법을 이용하여 평형운전조건을 만족하면 역상분요소의 제거가 가능하며 정격운전점에서 회전자계의 정상분 요소만 존재하기 때문에 효율개선 효과를 얻을 수 있다. 또한, 고정자 동손최소화 조건을 적용하여 평형운전조건과 결합된 설계를 수행하면 추가적인 효율개선 효과를 얻을 수 있다 [1]-[2].

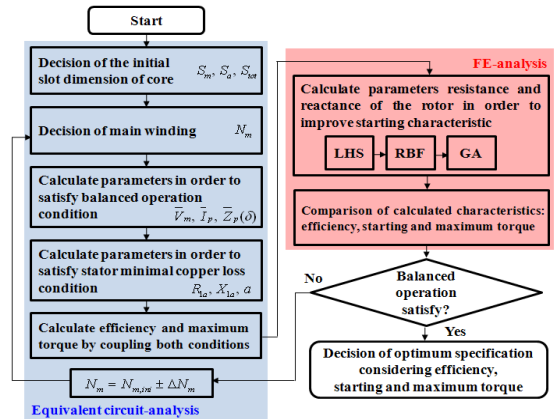
그러나 평형운전조건을 적용하여 설계된 경우 정상상태에서 고효율 특성을 갖는 장점은 있으나 기동토크가 다소 저하되었으며 정동특성을 고려하지 못한 문제점이 있다 [3].

본 논문에서는 평형운전조건이 적용된 단상 LSPM전동기의 실용적인 설계를 위해서는 기동특성과 정동특성이 반드시 고려되어야 하기 때문에 평형운전조건을 만족하는 120[W]급 단상 LSPM 전동기를 기본모델로 하며, 평형운전조건을 유지하는 동시에 적합한 기동특성 과 정동특성을 갖는 최적모델의 설계방법을 제안한다. 설계의 유효성을 검증하기 위하여 2차원 유한요소해석을 통하여 특성을 비교분석하였으며 제안한 설계방법의 타당성을 고찰하였다.

2. 최적설계 및 특성해석

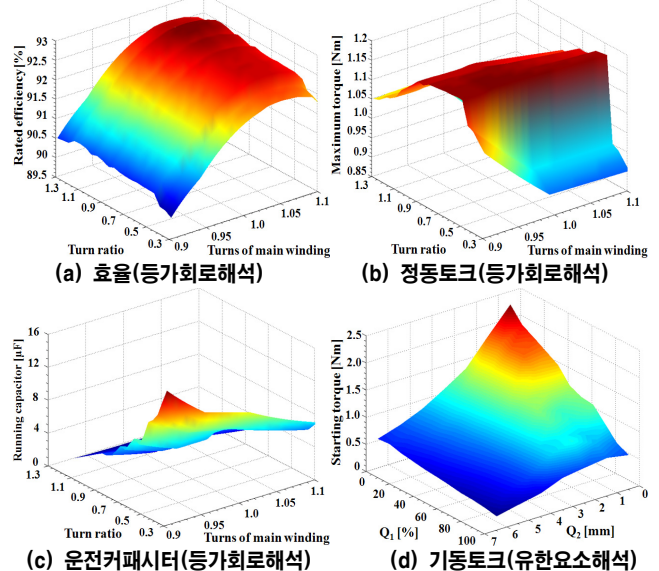
2.1 최적설계

그림 1에 정격에서의 평형운전조건과 고정자 동손 최소화조건을 만족하며 정동특성 및 기동특성을 고려한 최적설계 알고리즘을 나타냈다. 평형운전조건을 만족하는 기존의 120[W]급 단상 LSPM 전동기를 기본모델로 하며 정격효율과 정동특성 및 기동특성을 고려한 최적모델의 사양을 산출하는 것이 목적이다. 먼저 등가회로적 해석방법으로 평형운전조건과 고정자 동손 최소화 조건을 만족하는 상태에서 효율과 정동특성을 고려한 사양을 산출한다. 여기서 주권선과 보조권선의 사양이 결정되면 평형운전조건을 만족하기 위한 운전커패시터 값 또한 산출된다. 그리고 유한요소해석을 통하여 기동특성을 해석한다. 기동특성을 고려하기 위하여 회전자 도체바 면적(Q₁)과 축방향 엔드링 길이(Q₂)를 설계변수로 하며 Latin hypercube sampling(LHS)를 적용한 sampling point를 탐색하여 해석모델을 선정하였다. 이를 통한 결과로부터 Radial basis function(RBF)를 이용하여 근사모델링을 생성하였으며, 최적설계점의 탐색과정으로는 Genetic algorithm(GA)를 이용하여 정격효율과 정동특성 및 기동특성을 고려한 최적모델의 실용적인 사양을 결정한다. 기동특성을 고려하는 과정에서 최적의 회전자 도체바 면적과 축방향 엔드링 길이 결정과정에 의하여 회전자 형상이 변화된 최적모델의 사양이 평형운전조건을 만족하지 않는다면 평형운전조건을 만족하기 위하여 주권선 턴수를 변경하는 과정부터 재설계를 수행한다.



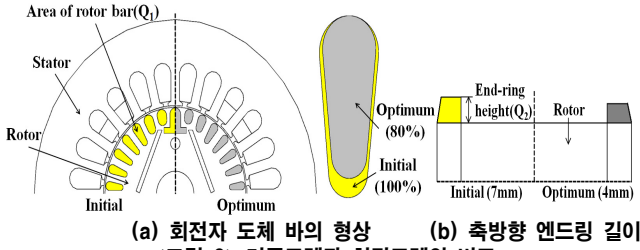
〈그림 1〉 최적설계 알고리즘

그림 2(a),(b),(c)에 등가회로 해석을 통하여 기존모델 사양을 기준으로 정격운전점에서의 주권선 턴수의 변동폭과 유효권수비에 따른 효율, 정동토크와 평형운전조건을 만족하기 위한 운전커패시터의 특성추이를 나타냈다. 여기서 주권선 턴수의 변동폭은 0.9~1.1, 유효권수비의 변동폭은 0.3~1.3의 범위로 각각 설정하였다. 결정된 권선 및 운전커패시터 사양을 바탕으로 기동특성의 고려를 위하여 회전자 도체바 면적(Q₁)과 엔드링 축방향 길이(Q₂)를 설계변수로 설정하였으며 각각에 따른 기동토크 특성추이를 그림 2(d)에 나타내었다. 이 때 변경된 회전자 저항의 성분으로 인하여 평형운전조건이 만족하지 않으므로 재설계를 수행하였으며 이를 통해 효율, 정동토크, 기동토크 각각의 특성을 종합적으로 고려한 실용적인 최적모델의 사양은 주권선 턴수의 변동폭 0.96, 유효권수비의 변동폭은 0.5, 운전커패시터는 8[μF]를 갖는 사양으로 결정하였다.



〈그림 2〉 주권선 턴수의 변동폭과 유효권수비에 따른 특성추이

그림 3에 최적설계 과정을 통하여 얻은 회전자 도체 바 면적과 축방향 엔드링 길이를 기존모델과 비교하여 나타냈다. 최적모델의 회전자 도체바의 형상은 기존모델 면적대비 80[%]로, 축방향 엔드링 길이는 4[mm]로 결정하였다. 표 1에 기존모델과 최적모델의 사양을 비교하였다.



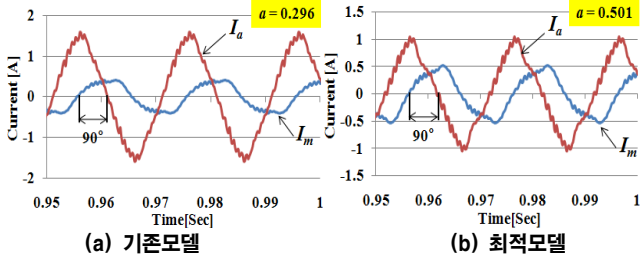
(a) 회전자 도체 바의 형상 (b) 축방향 엔드링 길이
 <그림 3> 기존모델과 최적모델의 비교

<표 1> 기존모델과 최적모델의 사양 비교

항목	단위	기존모델	최적모델
정격출력	W		120
입력 전압/주파수	V/Hz		220/50
극수	-		2
유효 권수비	-	0.296	0.501
주/보조권선저항	Ω	20.4/1.8	18.4/4.1
슬롯접유면적(주/보조권선)	mm^2	866.7/866.7	875.6/875.6
회전자 저항/누설 리액턴스	Ω	37.4/16.8	57.0/17.1
기동/울전 커패시터	μF	60/14	60/8

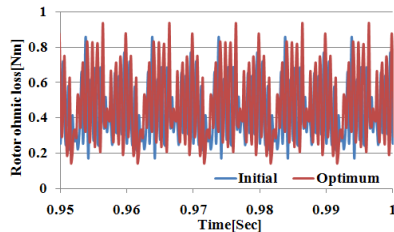
2.2 특성해석

기존모델과 최적모델의 평형운전의 만족 여부를 확인하기 위하여 그림 4에 주-보조권선의 전류특성을 각각 비교하였다. 표 1의 유효 권수비를 곱하면 주-보조권선에서 각각 발생하는 기자력의 크기가 동일하며, 위상차는 90도이므로 두 모델 모두 평형운전조건이 성립함을 알 수 있다.



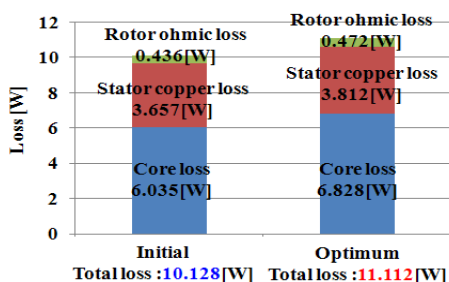
(a) 기존모델 (b) 최적모델
 <그림 4> 주-보조권선의 전류특성비교(유한요소해석)

그림 5에 회전자 동손을 비교하였다. 기존모델과 최적모델의 회전자 동손은 각각 0.436[W], 0.472[W]를 발생하였다. 최적모델의 회전자 동손이 상승한 이유는 회전자 저항의 증가로 인한 것임을 알 수 있다. 또한, 이론처럼 손실이 0이 되지 않은 이유는 등가회로에서 고려하지 못한 슬롯 및 권선 고조파성분에 의한 영향으로 사료된다.



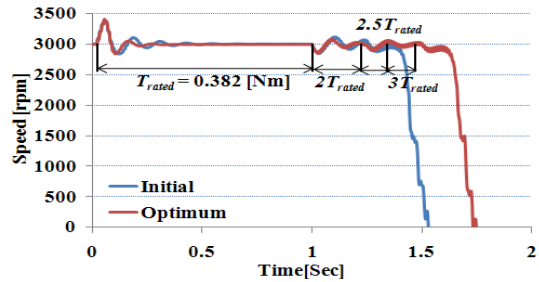
<그림 5> 회전자 동손 비교(유한요소해석)

그림 6에 고정자 동손, 회전자 동손 및 철손에 해당하는 전체 손실 분포 비교를 나타내었다. 물론 최적모델 또한 평형운전조건과 고정자 동손 최소화 조건을 만족하지만 주권선 턴수와 유효권수비의 변동에 따른 권선사양의 변경으로 인하여 기존모델 대비 전류의 실효치가 증가하였고 이로 인하여 철심의 자속밀도 또한 약간 증가하였으므로 기존모델 대비 전체 손실량이 증가함을 알 수 있다.



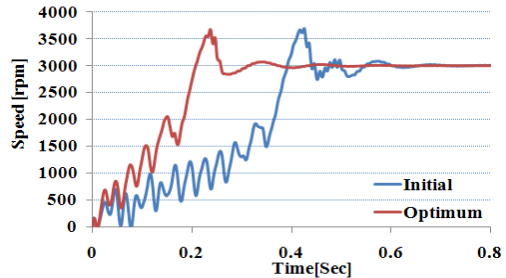
<그림 6> 손실분포 비교(유한요소해석)

정동특성의 비교를 위하여 그림 7에 부하를 인가한 해석을 나타내었다. 기존모델과 최적모델은 각각 정격토크(0.382[Nm])의 2.5배(0.955[Nm]), 3배(1.146[Nm]) 지점에서 동기화를 상실하였다. 이를 통해 기존모델대비 최적모델의 정동특성이 개선됨을 알 수 있다.



<그림 7> 정동특성비교 : 시간 VS 속도(유한요소해석)

기동특성의 비교를 위하여 기동시점부터 동기화 시점까지의 속도특성을 그림 8에 나타내어 비교하였다. 유한요소해석을 통한 기동토크는 기존모델은 0.471[Nm], 최적모델은 1.104[Nm]을 나타냈으며, 동기속도 3000[rpm]까지의 진입시간은 기존모델의 0.4초에서 최적모델의 경우 0.2초로 단축되었다. 이는 기존모델보다 최적모델의 회전자 저항이 증가하였으므로 기동특성이 향상된 것임을 알 수 있다.



<그림 8> 속도특성 비교(유한요소해석)

표 2에 기존모델과 최적모델의 특성을 비교하였다. 최적모델의 정격효율은 기존모델보다 감소하였으나 기동특성 및 정동특성이 개선되어짐을 확인하였다.

<표 2> 기존모델과 최적모델의 특성비교

특성항목	기존모델		최적모델	
	등가회로	유한요소	등가회로	유한요소
정격효율 [%]	92.63	91.56	91.54	90.74
정동토크 [Nm]	0.937	0.955	1.165	1.146
기동토크 [Nm]	-	0.471	-	1.104

3. 결 론

본 논문에서는 대칭자계법을 적용한 등가회로 해석방법을 이용하였으며 자기적 평형과 고정자 동손 최소화 조건을 이용한 단상 LSPM 전동기의 설계방법을 기반으로 하는 정격효율, 정동특성 및 기동특성을 고려한 실용적인 설계 방법을 제안하였다. 또한 이를 통해 최적모델의 설계사양을 결정짓고 유한요소해석을 통해 특성을 분석하였다. 최적모델의 정격효율은 기존수준보다 약간 감소하였으나 정동과 기동측면에서는 설계변수를 이용한 최적설계를 통하여 각각의 특성을 향상시켰다. 해석과 고찰을 통하여 본 연구에서 제안한 설계방법의 적합성을 입증하였다.

본 연구는 교육과학기술부가 후원하는 한국과학재단의 세계수준의 연구중심대학육성사업(WCU)으로부터 지원받아 수행되었습니다.(R33-2008-000-10104-0). 본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다.(2010T100200243)

[참 고 문 헌]

- [1] Tine Marcic, et al., "Line-starting three- and single-phase interior permanent magnet synchronous motors-Direct comparison to induction motors", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 44, No.11, pp.4413-4416, Nov., 2008.
- [2] B. T. Kim, et al., "Influence of Space Harmonics on Starting Performance of a Single-Phase Line Start Permanent-Magnet Motor", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 44, No.12, pp.4668-4672, Dec., 2008.
- [3] Soo-Whang Baek, et al., "Design Methodology of a Single-phase Line Start PM Motor Using Conditions for Magnetic Balance and Copper Loss Minimization", The 14th Biennial IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation, 20P8, May, 2010.