

EMF-Inductance Map을 이용한 초전도 동기 전동기의 설계

이지영, 반지형, 홍정표, 조영식*, 권영길*
 창원대학교 전기공학과, 한국전기연구원*

Design of Superconducting Synchronous Motor using EMF-Inductance Map

Ji-Young Lee, Ji-Hyung Bahn, Jung-Pyo Hong, Young-Sik Jo*, and Young-Kil Kwon*
 Changwon National University, Korea Electrotechnology Research Institute*

Abstract - For synchronous motor, back-EMF and inductance have mainly effect on the characteristics of the motor. Therefore inductance and back-EMF ranges should be limited to obtain desirable characteristics, and it is possible to get design goal easily by adjusting those two parameters.

In this paper EMF-Inductance Map(E-L Map) is presented in order to predict the performance of a motor in initial design. By applying the E-L map to design process of IMW super-conducting synchronous motor it's usefulness is verified.

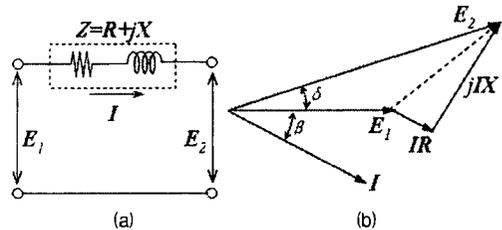


그림 1. (a) 단자전압과 역기전력 사이의 임피던스; (b) 벡터도

여기서, E_1 , E_2 , $|Z|$ 는 각각 인가전압, 역기전력, 임피던스의 크기를 나타내고, δ 는 부하각, θ 는 역률각이다.

1. 서 론

동기전동기의 경우 저항은 리액턴스에 비해 상대적으로 작은 값을 가지므로 전동기의 특성에 큰 영향을 미치지 않는다. 그러나 역기전력과 인덕턴스는 전기자와 계자 턴 수, 또는 축방향 길이와 같은 설계 변수에 따라 직접적으로 변화할 뿐만 아니라, 전동기의 특성에도 큰 영향을 준다. 따라서 원하는 출력특성을 가지기 위한 역기전력과 인덕턴스의 값의 범위를 결정할 수 있고, 전동기 설계 단계에서 이 두 파라미터를 점검하여 목표 값에도달하게 함으로서 빠르고 신뢰성 있는 설계를 진행할 수 있다.

본 논문에서는 설계 단계에서 역기전력과 인덕턴스를 점검하여 전동기의 성능을 쉽게 예측할 수 있는 EMF-Inductance Map(E-L Map)을 제시한다. 설계 초기 단계에서 E-L map이 그려지면 전동기의 특성인 출력, 효율, 역률, 전류밀도 등이 E-L 좌표에 표시 된다. 설계 시 제약 조건이나 필요한 성능에 따라 map은 contour line을 가진다. 전동기를 설계하는 동안 인덕턴스와 역기전력은 map에 한 점으로 나타내어지며 이 점을 이동시킴에 따라 설계방향은 쉽게 결정될 수 있다. 본 논문에서 제안하는 설계 방법을 IMW 초전도 동기 전동기 설계에 적용하여 그 효율성을 보였다.

2. 본 론

2.1 동기 전동기의 출력 방정식

비돌극성을 가지는 동기 전동기에서 철손과 기계손을 포함하고 있는 전기적인 출력 P_e 는 다음 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$P_e = \frac{E_1 E_2 \sin(\delta + \alpha_2)}{|Z|} - \frac{E_2^2 R}{|Z|^2} \quad (1)$$

$$\alpha_2 = 90^\circ - \theta = \tan^{-1} \frac{R}{X}, \quad \theta = \cos^{-1} \frac{R}{|Z|}$$

각 파라미터의 관계는 그림 1의 간략화된 회로와 벡터도에서 볼 수 있다. 식 (1)에서 나타낸 바와 같이 출력은 인가전압과 역기전력, 그리고 임피던스에 의해서 결정된다. 동기에서 저항은 일반적으로 리액턴스에 비해 아주 적은 값을 가지므로, 전기자 턴수의 변화와 같은 설계 변수의 변화에 의해 변화된 저항이 특성에 미치는 영향은 무시할 수 있을 정도이다[2]. 따라서 저항 성분을 무시하고, 인가전압은 시스템에 의해서 이미 결정되었을 때, 역기전력과 회로의 인덕턴스에 의해서 전동기의 출력이 결정된다고 볼 수 있다. 따라서 철심을 사용하지 않아 비돌극성을 가지는 초전도 동기 전동기의 설계 단계에서 설계 변수의 변화에 따른 역기전력과 인덕턴스 지도를 만들어 설계에 활용 하도록 한다.

2.2 E-L Map 구성

전동기의 초기 설계 단계에서 역기전력과 인덕턴스를 이용하여 E-L Map을 구성한다고 할 때, E-L Map 상에 표시되는 등고선은 대상전동기의 제약 조건에 의해서 결정된다. 즉, 제한되는 전류밀도, 출력, 역률, 효율 등에 의해서 등고선이 그려지는데, 그에 대한 자세한 방법은 각각의 범위 결정 부분에서 설명하도록 한다.

E-L Map에서 역기전력과 인덕턴스의 범위는 설계 목적에 따라 가변적이므로, 여기서는 하나의 예로서 IMW 초전도 전동기의 설계에 사용하기 위하여 역기전력의 범위를 단자전압의 약 80-100%, 인덕턴스의 범위는 약 0.1-0.5pu에서 그 특성을 보였다.

2.2.1 전류 또는 전류밀도를 만족시키는 범위 결정

전류 또는 전류밀도에 대한 제약조건이 주어졌을 때, 이에 대한 등고선을 E-L Map에 반영 한다. 동기기의 간략화된 등가회로인 그림 1에서, 상전류는 식 (2)로부터 계산할 수 있다.

$$I = \frac{E_1 - E_2}{Z} \quad (2)$$

식 (2)에서 단자전압과 저항을 상수로 두면, 역기전력과 인덕턴스의 변화에 따른 전류값을 산정할 수 있으며, 식 (1)과 연관했을 때, 일정한 출력 상에서 동일한 전류값을 가지는 역기전력과 인덕턴스 조합을 얻을 수 있다. 정격 출력 1MW에 대해서 이를 E-L Map 상에 나타낸 것이 그림 2와 같고, 6개의 등고선 중 가장 상단의 짙은 선은 각각의 인덕턴스와 역기전력 값의 조합에 의해서 전류가 200A 흐를 때이고, 이를 기준으로 사선으로 표시된 상단은 입력 전류가 200A 이하인 부분이다. 전기자 도체의 단면적이 정해지면, 전류에 대한 등고선을 전류밀도에 대한 등고선으로 치환할 수 있다.

2.2.2 역률과 효율을 만족시키는 범위 결정

인덕턴스 변화에 따른 역률은 식 (1)에서 정의한 각도 θ 에 의해서 결정되며, 전동기의 입력 P_{in} 을 식 (3)과 같이 나타낼 때, 효율 ϵ 은 식 (4)와 같이 계산할 수 있다. 여기서는 동손만을 고려하였다.

$$P_{in} = \frac{E_1 E_2 \sin(\delta - \alpha_2)}{|Z|} + \frac{E_1^2 R}{|Z|^2} \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{P_c}{P_{in}} \quad (4)$$

전류에 대한 등고선을 그렸을 때와 같이 1MW 출력에 대해서 역률과 효율에 대한 등고선을 각각 그림 3과 그림 4에 나타내었다.

2.2.3 출력을 만족시키는 범위 결정

역기전력과 인덕턴스 조합에 의해서 전동기의 출력을 식 (1)에 의해서 산정 할 때, 부하각 δ 가 90도에서 낼 수 있는 최대 출력을 그림 5 (a)에 나타내었다. 정격 출력 1MW가 최대 출력에 대해 차지하는 비율을 그림 5 (b)와 같이 산정함으로써, 전동기의 안정도를 예측할 수 있다. 그러나 그림 5 (a)의 최대출력은 입력 전류에 대한 고려 없이 산정된 값이므로, 실제적으로는 고려 대상이 되는 영역이 줄어들 게 된다.

2.2.4 모든 조건을 만족시키는 범위 조합

앞서 검토된 전동기의 제약조건에 따른 각각의 등고선들을 조합하여 그림 6과 같이 하나의 E-L Map을 구성할 수 있다. 이는 대상 초전도 전동기의 정격 출력 1MW에 대한 E-L Map으로서, 입력 전류를 200A 이하, 역률은 90% 이상, 효율은 98% 이상을 만족하는 영역에 대해서 본 것이다. 이상의 조건을 만족하면서 최대 출력이 정격의 1.5배 이하되는 범위를 G1 영역으로, 최대 출력이 정격의 3배 이하되는 범위를 G2 영역으로 구분하였는데, 이 두 영역에 대한 역기전력과 인덕턴스 범위는 표 1에 정리하였다. 이상으로 만들어진 E-L Map을 가지고, 초기 설계된 전동기의 위치를 파악하여, 설계 목적에 따라 G1 또는 G2 영역에 들도록 설계 파라미터를 조정하면서 설계를 진행해 나갈 수 있다.

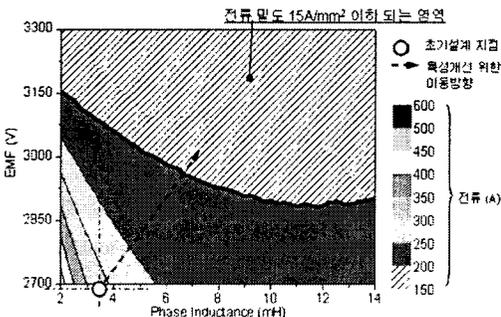


그림 2. 선간 역기전력과 상 인덕턴스 변화에 따른 상전류

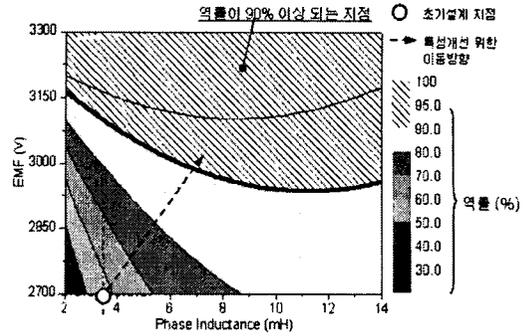


그림 3. 선간 역기전력과 상 인덕턴스 변화에 따른 역률

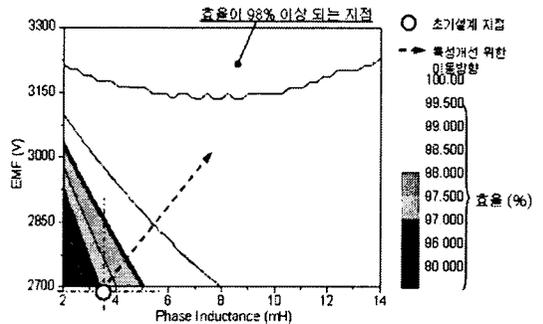


그림 4. 선간 역기전력과 상 인덕턴스 변화에 따른 효율

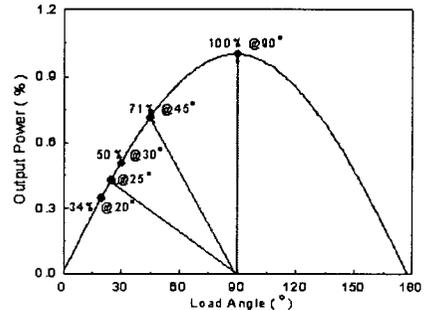
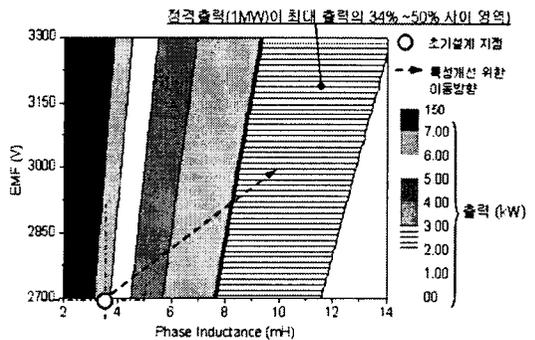


그림 5. (상)선간 역기전력과 상 인덕턴스 변화에 따른 최대 출력; (하)부하각에 따른 출력비(전동기 최대출력=100%)

표 1. 모든 조건을 만족시키는 역기전력과 인덕턴스 범위

목표영역	최대출력	상인덕턴스	선간역기전력
G1 영역	3~6MW	4~9mH	3040V이상
G2 영역	2~3MW	9~13mH	2900V이상

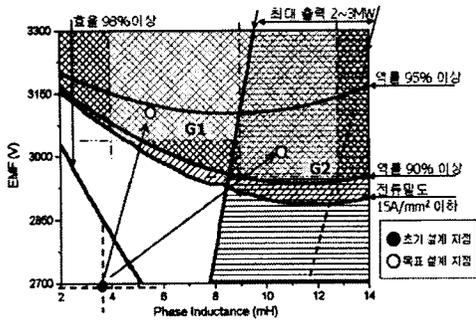


그림 6. 1MW 초전도 동기 전동기의 정격 출력 지점에 대한 E-L Map과 최대 출력 범위에 의해 구분되는 G1, G2영역

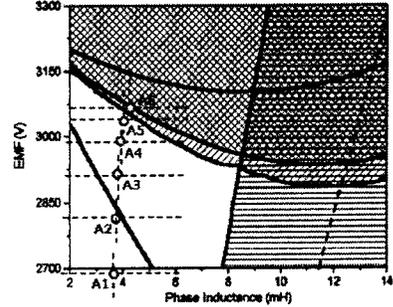


그림 8. 전기자 적층 길이 변화에 따른 E-L Map 상에서의 파라미터 변화추이

2.3 E-L Map을 이용한 초전도 전동기 설계

2.3.1 초전도 동기 전동기 초기설계 결과

1MW 초전도 전동기를 2차원적으로 설계 한 뒤, 3차원 해석을 수행하면, 출력 특성이 다소 달라진다. 이는 [3,4]에서 검토된 바와 같이 고정자와 회전자를 모두 공심형을 사용함으로써, 축방향으로 일정한 자속을 얻을 수 없기 때문에 축방향 자속밀도 분포를 일정하다고 가정하는 2차원적 특성해석 결과가 오차를 포함하기 때문이다. 따라서 역율이 90% 이상, 손손만 고려시 효율이 98%이상, 전류 200A이하가 되도록 설계한 초기 설계 결과에 대해서 3차원 해석을 수행하여 얻은 결과는 표 2와 같다. 역율과 전류밀도의 경우 설계 조건을 만족시키지 못하므로 보완 설계 및 최적 설계가 필요하다.

그러나 초기 설계 결과에서부터 설계 변수를 변화시켜 3차원 특성해석을 수행하여 원하는 출력 특성이 나오는지 확인하는 작업은 번거로운 뿐만 아니라 많은 시간이 걸린다. 따라서 각 설계 변수의 변화에 따라 역기전력과 인덕턴스만을 산정하여 미리 정해놓은 E-L Map에서 그 추이를 파악하고 최종 결정된 하나의 모델에 대해서만 정밀한 해석을 수행한다면, 효과적인 설계를 진행해 나갈 수 있을 것이다.

2.3.2 E-L Map을 이용한 설계 결과

그림 7은 1MW 초전도 전동기의 축방향 절단면에 대한 개념도이다. 초기 결정된 형상을 수정하여 원하는 특성을 얻기 위해서 설계 변수 중 적층 길이를 변화시켜보았다. 초기 설계에서 결정된 전기자 적층 길이 355mm를 기준으로 이 때의 해석 모델을 A1이라고 했을 때, 25mm씩 증가시키면서 역기전력과 인덕턴스를 산정하여 E-L Map에서 그 추이를 점검해 본 것이 그림 8과 같다. 전기자 적층 길이가 480mm가 된 A6 모델의 경우, E-L Map의 G1 영역에 들어간 것을 확인하고, 이에 대해서 특성해석을 수행해 본 결과는 그림 9와 같다.

표 2. E-L Map을 사용하기 전 초전도 전동기 초기 설계결과

정격용량	1MW	단자전압	3300V
정격속도	3600rpm	역율	60% (lag)
극수/슬롯수	2극/24슬롯	효율	95.5 %
전기자 적층길이	355mm	전기자도체 전류밀도	23.5A/mm²
계자동작전류	150A	동기리액턴스	0.15 pu

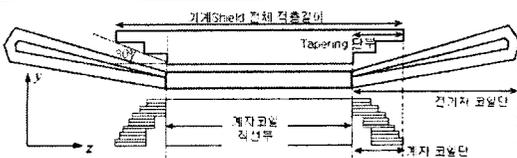


그림 7. 초전도 전동기 축방향 단면도

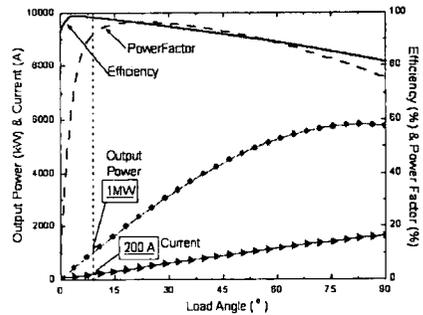


그림 9. 전기자 적층 길이 480mm인 A6-모델에 대한 부하 각 변화에 따른 전동기 특성 (출력, 전류, 효율, 역율) 그래프

3. 결 론

본 논문에서는 동기 전동기 설계 단계에서 효과적으로 사용할 수 있는 E-L Map을 작성에서 부터 이용하는 방법에 대한 것을 1MW 초전도 전동기 설계를 예를 들어 설명하였다. 역기전력과 인덕턴스의 특정 범위 내에서 제약 조건에 의해서 결정되는 등고선을 조합하여 설계 목적이 되는 영역을 결정하고, 최초 설계된 전동기의 파라미터가 있는 지점에서 목표 지점에 도달하기까지의 추이를 E-L Map 상에 나타낼 수 있다. 설계 변수 변화에 따른 복잡한 특성해석을 모두 하는 대신 역기전력과 인덕턴스만을 산정하여 설계 목표 지점의 도달 여부를 파악할 수 있으므로 초기 설계 단계에 있어서 효과적으로 이용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 차세대 초전도용융기술개발 사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

[1] A.E.Fitzgerald, Charles Kingsley Jr., Stephen D. Umans, "Electric Machinery," McGraw-Hill Publishing Company, 1990
 [2] 이지영, 남혁, 이근호, 홍정표, 장기찬, "행방향 성층형 회전자를 가지는 동기형 릴럭턴스 전동기 설계," 대한전기학회 하계 학술대회, pp.952-954, 7, 2003
 [3] Ji-Yung Lee, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong, Seung-Kyu Baik, Young-Kil Kwon, "A Novel Design Method using 3D Equivalent Magnetic Circuit Network in Superconduction Motor," ICEMS(International Conference on Electrical Machines and Syst), information in CD, 2004
 [4] 이지영, 권순오, 홍정표, 백승규, 손명환, 권영길, "공심형 초전도 전동기 설계에 관한 연구," 한국 초전도 저온 공학회, p.170-173, 10, 2004