

3차원 자장 해석을 통한 1 MW 급 고온초전도 모터의 특성 해석

백승균, 손명환, 이재득, 이연용, 권영길, 문태선*, 박희주*, 김영춘*, 박관수**
 한국전기연구원 초전도응용연구그룹, 두산중공업(주) 기술연구원*, 부산대학교 전자 전기 정보 컴퓨터 공학부**

1 MW class High-temperature Superconducting Motor Performance Analysis via 3-dimensional Magnetic Field Analysis

S. K. Baik, M. H. Sohn, J. D. Lee, E. Y. Lee, Y. K. Kwon, T. S. Moon*, H. J. Park*, Y. C. Kim*, G. S. Park**
 Korea Electrotechnology Research Institute, Doosan Heavy Industries & Construction Co.*, Pusan National University**

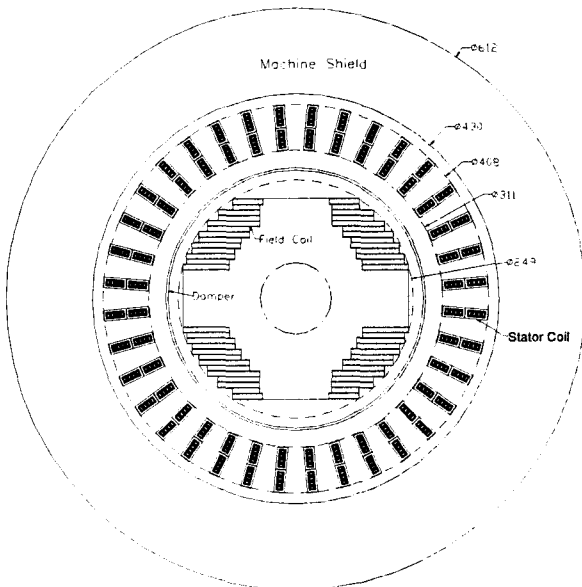
Abstract - Different from the conventional motor, the superconducting motor has so large air-gap that the actual parameters such as excitation voltage have considerable difference from the values obtained from 2-dimensional electromagnetic analysis. This paper introduces 3-dimensional EMCN(Equivalent Magnetic Circuit Network) method or FLUX-3D FEM(Finite Element Method) software to reduce the error originated from the 2-dimensional electromagnetic analysis for the development of a 1 MW class high-temperature superconducting motor.

1. 서 론

기존의 동기는 공극이 매우 작기 때문에 축방향을 따라서 자장의 분포가 거의 일정하므로 2차원적인 해석만으로도 역기전력을 정확히 구할 수 있지만, 초전도 동기의 경우는 최외각의 기계실드(Machine Shield)를 제외하면 모두 공극이므로 코일의 단부로 갈수록 자장이 감소하고 기계실드의 축방향 길이와 형상에 따라서 2차원적인 해석 결과와는 상당한 차이가 존재한다. 따라서 2차원 원통좌표계를 기준으로 자장의 분포를 이론적으로 구하여 설계된 1 MW 급의 초전도 동기 모터를 축방향의 형태에 따라서 그 출력특성을 3차원적으로 해석하여 더욱더 최적화된 설계를 하고자 한다.

2. 본 론

2.1 2차원적 해석에 의한 1 MW 급 초전도모터의 1차 설계안



〈그림 1〉 2차원 해석에 의한 1 MW 고온초전도 모터의 설계 횡단면 (mm 단위)

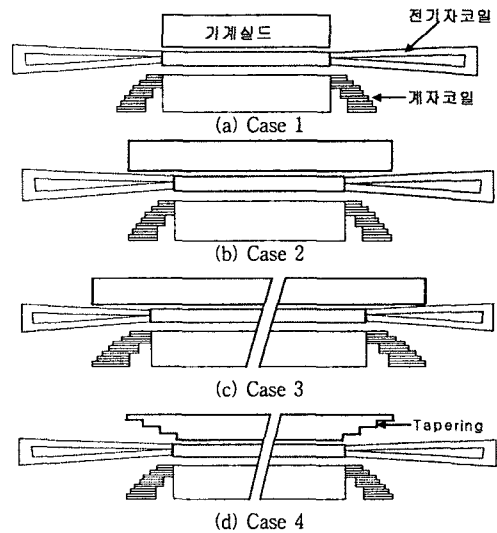
〈표 1〉 2차원 해석에 의한 고온초전도 동기 모터의 초기 설계 사양

정격용량	1 MW	계자코일 턴 수	3348
정격속도	3600 rpm	계자코일 초전도체	Bi-2223
주파수	60 Hz	계자코일 동작온도	약 30 K
극수	2 극	축방향 직선부 길이	414 mm
정격 단자전압	3300 V	전자자 슬롯 수	36
선간 역기전력	3100 V	전자자 코일 턴 수	48 턴/상
계자 동작전류	150 A	전자자 냉각방식	수랭식
계자도체 전류밀도	115 A/mm ²	설계 효율	97.77 %

3차원 해석의 기본 모델로 사용된 2차원 자장 해석 방법에 의한 1 MW 초전도모터의 설계 사양을 그림 1과 표 1에 나타낸다.

2.2 3차원 자장 해석을 통한 1 MW 급 초전도모터의 특성 해석

앞에서 결정된 2차원적인 접근 방법에 의한 설계안은 기기의 축방향에 따른 자장의 변화가 없다고 보고 설계한 것이다. 하지만 앞에서 설명한 바와 같이 초전도 동기는 공극이 기기의 대부분을 차지하고 있으므로 공극이 매우 작은 기존의 기기와는 달리 3차원적인 실제의 자장 분포와 2차원적인 해석 결과가 상당히 차이가 생긴다. 또한 2차원적인 해석 방법으로는 코일의 단부에 의한 영향을 고려할 수 없으므로 정확한 설계를 위해서는 3차원적인 해석을 바탕으로 하는 설계가 필요하다. 설계하고자 하는 1 MW 고온초전도 모터의 횡단면은 그림 1과 같은 구조로 하고 축방향의 구조에 따른 3차원적인 특성 해석을 수행하고자 한다. 축방향의 해석 형태는 그림 2에서와 같이 4가지의 경우로 나누어서 3차원 해석 결과를 상호 비교하여 적절한 형태를 최종적으로 결정하였다.



〈그림 2〉 3차원적 영향 해석을 위한 축방향 형상 비교

3차원 해석에 이용된 기법은 3차원 EMCN(Equivalent Magnetic Circuit Network) 방법과 Flux3D 유한요소해석 상용 프로그램으로서 1 MW 고온 초전도 모터의 축방향 형상에 따른 특성을 분석하여 최종 설계안을 도출하고자 한다. 그림 2의 (a)는 투자율이 높은 규소강판으로 구성되는 기계실드의 축방향 적층길이를 표 1의 2차원적 해석 방법을 통하여 결정된 레이스 트랙(Racetrack) 형 계자코일의 축방향 직선부 길이로 두었다. (b)는 기계실드가 반원형의 계자코일 단부를 축방향으로 모두 덮도록 한 구조이다. (a)와 같은 경우는 역기전력이 2차원 해석의 초기 설계치보다 적어서 정격에서 전자자코일의 전류가 설계치보다 높았다. 이는 3차원적인 자장 값이 2차원적인 자장 값보다 적고, 계자코일의 단부에서 발생하는 자장을 역기전력의 발생에 이용하지 못하기 때문이다. (b)의 경우는 역기전력이 설계치보다 높아서 정격에서 전자자코일의 전류가 설계치보다 낮았다. 이는 2차원적인 접근 방법에서는 계자코일의 단부에서 발생하는 자장이 고려되지 않았기 때문이다. 따라서 계자코일에서 발생하는 자장을 최대한 이용하고 전자자코일의 축방향 길이를 줄이기 위하여 (c)와 같은 구조를 검토하였다. 최종적으로는 (d)와 같이 계자코일의 단부 영역에서 기계실드에 계단 형태로 Tapering 을 두어 다이아몬드형의 전자자코일 단부가 회전자와 접촉되지 않게 하는 실제 제작 상황을 고려한 구조를 선정하였다[1].

2차원적인 접근 방법으로 얻어진 그림 1의 횡단면 형태를 가지고 종단면으로는 그림 2와 같은 4가지 Case 에 대하여 표 2와 같이 몇 가지의 경우로 나누어서 3차원 해석에 따른 특성을 분석하기로 한다. Case 1은 2차원

적 설계 방법으로 얻어진 계자코일의 축방향 직선부 길이(straight length)와 동일하게 기계실드의 축방향 길이를 414 mm 으로 두었으며, Case 2는 기계실드가 계자코일의 축방향 전체길이와 일치하도록 하였다. Case 3은 축방향 직선부 길이를 약간씩 감소시키면서 특성을 보았으며, Case 4는 기계실드의 단부에 계단형의 Tapering 을 두어 제작시 전기자코일의 단부가 꺾이는 영향을 감안하여 그 영향을 보았다.

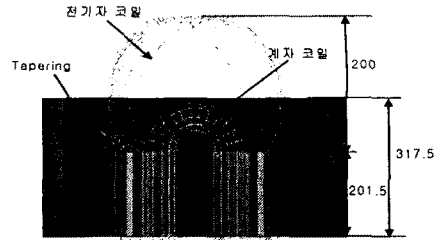
〈표 2〉 1 MW 고온초전도 모터의 3차원 해석 Case

설계 변수	Case 1	Case 2	Case 3-1	Case 3-2	Case 3-3	Case 3-4	Case 3-5	Case 4-1	Case 4-2	
계자코일 내경 (mm)	169									
계자코일 외경 (mm)	249									
전기자코일 내경 (mm)	311									
기계실드 내경(mm)	430									
기계실드 외경 (mm)	612									
기계실드 축방향 길이 (mm)	전체길이	414	646.8	626.1	605.4	584.7	564	543.3	615	635
	직선부 길이	414	414	393.3	372.6	351.9	331.2	310.5	383	403
전기자코일 단부 축방향 길이(mm)	200									
극수	2									
계자코일 직선부 길이(mm)	414	414	393.3	372.6	351.9	331.2	310.5	383	403	
계자코일 권선각 (deg.)	120									
계자코일 턴 수	3348									
계자코일 전류(A)	150									
전기자코일 상당 턴 수	48									

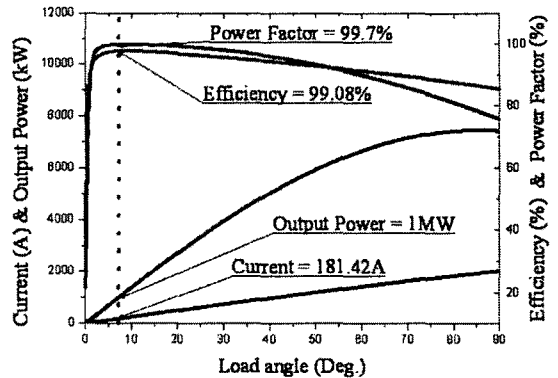
2차원적 설계 방법에 따라서 결정된 축방향 직선부 길이는 414 mm 이고 Case 1에서는 그림 2의 (a) 에서와 같이 기계실드의 축방향 적층을 축방향 직선부만을 덮도록 하여 특성 해석을 수행하였다. 3차원 EMCN 을 이용하여 산정된 선간 역기전력은 2794 V 이며 전기자코일의 동기인덕턴스는 3.4 mH 이었다. 이 값은 표 1의 초기 설계안의 선간 역기전력 3100 V 보다 훨씬 적은 값이며, 3차원적인 자장 값이 2차원적인 해석 값보다 적고 기계실드가 계자코일 단부를 덮지 않기 때문에 코일의 단부에서의 자장의 이용률이 적어서 발생한 것으로 보인다. 역기전력이 초기 설계치보다 적어졌으므로 정격 출력에서의 전기자 전류는 상대적으로 초기 설계치 196 A 보다 훨씬 큰 290 A 이었다. 이렇게 역기전력이 감소함에 따른 전기자 전류의 증가는 동손을 크게 증가시키고 효율을 떨어뜨려서 만족할만한 기기의 특성을 얻을 수 없었다. Case 2에서는 기계실드가 축방향으로 계자코일의 직선부와 단부를 모두 덮도록 하였다. 이때에 발생하는 선간 역기전력은 3561 V 이었으며 역기전력이 단자전압 3300 V 보다 컸다. 이것은 기계실드의 축방향 길이 증가로 인하여 계자코일의 단부에서 발생하는 자속이 역기전력의 발생에 기여했기 때문이다. 이 경우는 역기전력이 단자전압보다 큰 전상역률으로 동작을 하며 정격 1 MW 에서 부하각은 8.82° 이고, 역률은 90.20% 이며 전기자전류는 200.72 A 이었다. 또한 3차원 EMCN 으로 구한 전기자코일의 동기인덕턴스는 4.48 mH 이었다[2].

〈표 3〉 Case 3 에서 3차원 해석 결과

	선간 역기전력 (V)	동기 인덕턴스 (mH)	출력 1 MW 에서 특성				
			상전류 (A)	전류밀도 (A/mm ²)	효율 (%)	역률 (%)	부하각 (°)
Case 3-5	2867 (80.5%)	4.00 (89.3%)	246	10.7	96.90	73.57	8.91
Case 3-4	3005 (84.4%)	4.09 (91.3%)	211	9.2	97.25	85.02	8.82
Case 3-3	3144 (88.3%)	4.19 (93.5%)	189	8.2	97.43	95.16	8.82
Case 3-2	3283 (92.2%)	4.29 (95.7%)	181	7.9	97.45	99.99	8.82
Case 3-1	3422 (96.1%)	4.38 (97.7%)	185	7.9	97.31	97.59	8.82
Case 2	3561 (100%)	4.48 (100%)	201	8.7	97.03	90.2	8.82



〈그림 3〉 Case 4-2 의 3차원 해석 모델



〈그림 4〉 Case 4-2 의 특성 해석 결과

Case 3에서는 Case 2에서의 해석 모델을 기준으로 하여 축방향의 직선부 길이를 감소시키면서 단자전압보다 컸던 역기전력을 줄이면서 기기의 특성을 분석하였다. Case 2에서의 기계실드 축방향 전체 길이는 646.8 mm (직선부 길이 414 mm)이었으며 축방향 길이를 감소시키면서 얻어진 특성 해석 결과를 표 3에 보인다. 축방향의 직선부 길이가 감소할수록 전기자코일과 쇠코어는 자속량이 감소하므로 역기전력이 감소하며, Case 2에서의 전상역률이 100 % 가 되었다가 지상역률로 감소되는 추이를 볼 수 있다. Case 4에서는 전기자 코일의 단부가 권선이 될 경우에 회전자와의 마찰을 없애기 위해서 기계실드의 단부를 계단 형상으로 각도를 주는 형태(Tapering)의 영향을 보았다. 기계실드의 단부에 30° 의 각도를 주고 FLUX-3D 을 이용하여 역기전력을 계산하였다. Case 4-1에서 각도를 주기 전에는 3352.8 V 의 역기전력이 발생하였으나 각도를 주었을 경우에는 3138 V 의 역기전력이 발생하여 6.4% 감소하였다. Tapering 에 따른 역기전력의 감소 비율이 해석을 통하여 거의 일정함을 확인한 후, 출력 특성(효율)이 가장 좋도록 축방향의 길이를 Case 4-2와 같이 635 mm 으로 결정하였다. 그림 3 에 FLUX 3D 을 이용하여 Tapering 의 영향을 보기 위한 최종 설계안인 Case 4-2 의 해석 모델의 형태를 보여주며, 이때의 축방향 직선부의 길이는 403 mm 이며 2차원적 접근방법에 의해서 구해진 414 mm 보다 11 mm 축방향 길이가 줄어들었다. 계산된 역기전력은 3263 V 이며 전기자코일의 동기인덕턴스는 3.525 mH 이다. 그림 4 는 이상의 3차원 자장 해석을 통해 구한 역기전력을 이용하여 동기 모터의 부하각(Load angle)의 변화에 따른 최종 설계안의 출력 특성을 보여 준다. 여기서 효율은 동손만을 고려하여 계산하였으므로 다소 높은 값을 가진다.

3. 결 론

공극이 큰 초전도 모터의 구조로 인한 2차원적인 설계에 따른 오차를 줄이기 위하여, 3차원적인 자장해석을 통하여 동기모터의 역기전력을 구하고 설계하고자 하는 1 MW 급의 고온초전도 동기모터의 특성을 해석하였다. 이러한 결과로 설계된 초전도모터는 수랭식으로 전기자코일이 냉각되며, 기존의 산업용 공랭식 유도전동기보다 초전도코일의 냉각 장치를 포함하여도 1/5 의 크기이며 2% 정도 높은 효율을 가지도록 설계되었다.

본 연구는 21세기프론티어 연구개발사업인 차세대초전도응용기술개발사업단의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다

〈참 고 문 헌〉

- [1] 백승규, 이재득, 김석호, 이언용, 손명환, 권영길, 문태선, 박희주, 김영춘, 이지영, 홍정표, "수랭식 전기자코 구성된 1 MW 고온초전도 동기모터의 설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, B권, pp.1258-1260, 2005
- [2] 백승규, 손명환, 이언용, 권영길, 문태선, 박희주, 김영춘, "수랭식 1 MW 고온초전도 동기모터의 설계", 한국초전도·저온공학회는논문지, 7권 3호, pp.21-28, 2005