2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

2MW 풍력발전기용 영구자석형 동기발전기 설계

서형석, 한홍식, 정영규, 이홍기, 이월우, 김동언, 정진화, 전중환, 한경섭
포항공과대학교 포항풍력에너지연구소

Design of 2MW Permanent Magnet Synchronous Generator

Hyung Suck Suh*, Hong Sik Han, Young Gyu Jung, Hong Gi Lee, Wol Woo Lee,
Dong Eon Kim, Chin Wha Chung, Chung Hwan Chun, Kyung Seop Han
PoWER Center, POSTECH

Abstract - 2MW 풍력발전기용으로 사용할 영구자석형 동기발전기 물리설계 과정을 설명하다. 기어비가 72.28인 3단 기어를 사용하여 영구자석 pole을 회전자 표면에서 3 mm 깊이로 삽입시켜 안정된 구조를 취했다. 토크, 인덕턴스, 유기전압, 손실, 온도분포 등을 계산하기 위해 전자기해석과 열해석 등을 통해 영구자석, 회전자, 고정자 등의 구조를 정하고와 크기를 최적화시켰다.

1. 서 론

설계된 2MW 풍력발전기는 가변속 영구자석형인 동기발전기로 설계되었다. 계통연결을 위해 인버터를 사용하고, 출력 전압은 600 Volt 수준이다. 발전기의 크기를 작게 하기 위해 1:72.28 기어를 부착해서 육상으로 운반하는데 용이하게 설계했다. 기어비에 따라 회전자 속도가 커져서 영구자석을 회전자 속에 삽입하는 형태를 선택했다. 따라서 영구자석이 회전자 표면에 부착된 경우에 비해 자속(magnetic flux)이 19% 줄어들어서 발전기의 크기가 커지게 되었다. 정격운전 때 토크 ripple을 작게 되도록 영구자석의 폭을 선택했다. 그리고 적지 않은 회전속도 때문에 생기는 여러 가지 손실(losses)에 의한 발열을 해소하기 위해 고정자 외각을 water jacket 방식으로 냉각시킨다. 이 과제는 750 kW 발전기 설계와 제작 경험을 바탕으로 하게 되었다.[1] 2MW 발전기의 물리설계는 포항풍력에너지연구소에서 담당하고, 구조설계는 독일 Aerodyn에서, 발전기 제작은 (주)보국전기에서 담당한다.

2. 본 론

2.1 발전기 주요 parameters

기어, 발전기, 인버터 효율과 발전기 보조전력(yawing, pitching 등)의 합으로 약 60 kW를 발전기 자체에서 충당하고, 인버터 효율(0.96)을 감안해서 발전기 목표출력 2.0 MW의 102 %인 2.04 MW를 생산하도록 설계했다. 그래서 인버터로 전달되는 정격출력은 (2.04+0.06)/0.96 = 2.19 MW이다. 기어비는 경제성과 크기를 감안하여 72.28로 결정됐다. 공극 크기는 발전기 제작사의 경험과 안정성을 고려해서 4.0 mm로 했고 편심정도는 공극의 ±5%이다. 코일의 단면은 eddy current를 줄이기 위해 납작한 모양으로 10.5×1.5 mm^2 으로 하고 4가닥을 한 turn으로 하고, 슬롯 모양은 작업성을 좋게 하기 위해 직사각형으로 했다. 영구자석은 성능과 가격 그리고 수급조건을 고려해서 NdFeB 성분인 NEOMAX-38UH로 정했다. 이렇게 설계된 발전기는 외부 냉각장치까지 포함해서 지름이 1.5 m이고 축방향 길이가 1.0 m이다.

상용 프로그램인 ANSYS를 이용해서 영구자석과 전기강판의 BH-table을 적용한 비선형 계산으로 자기장, 인덕턴스, 토크, 열해석 등을 했다. 모델은 대칭성을 고려해서 회전자 두 pole 구간만을 계산했고 주기적인 boundary condition을 적용했다. 회전자 한 pole 구간을 60 등분해서 고정자와 회전자를 형상하고 회전자 운동은 영구자석의 물질특성만을 이동시켜서 회전운동 효과를 내서 계산했다. 2D 계산에서 이렇게 회전자 각도를 변화시키며 계산한 결과를 합산하면 3D 효과도 낼 수 있다. 인덕턴스, 유도전압 파형, eddy current 효과에 의한 손실 등을 계산할 때 이 방법을 적용했다.

발전기의 출력 주파수(260Hz 이하), 선간전압(600V), 기어비(1:72.28) 조건에 따라 발전기의 pole pair수는 12이고 한 pole에 3상의 slot이 하나 씩 있어서 Q=1인 발전기가 되었다. 전기회로 수도 12병렬로 해서 토크 균형을 잡았고 출력은 6병렬씩 짝을 이루어서 dual system을 이루었다. 표 1은 주요 변수와 인버터 control되는 경우의 결과를 나타낸다. 인버터에서는 reactive power를 조정해서 단말 전압을 open circuit 경우 유도전압과 크기가 비슷한 수준으로 유지하면서, armature 전류 위상을 단말전압 위상과 유도전압 위상의 중간에 위치시켜서 발전기의 power를 최적화시키고 있다.

<표 1> 발전기 주요 parameters

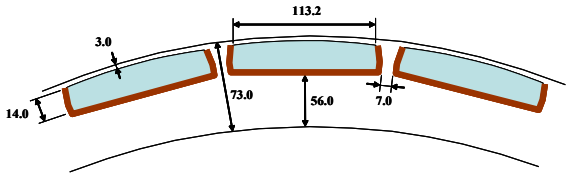
Parameters	Values	Units
target power	2.0	MW
gear ratio	72.28	
number of rotor pole pairs	12	
number of parallel circuits	12	
air gap	0.0040	m
outer diameter of frame	1.508	m
outer axial length of frame	0.998	m
rated blade rpm	15.3	RPM
rated generator rotor rpm	1105.9	RPM
number of slots	72	
horizontal coil size	10.5	mm
vertical coil size	1.5	mm
number of strands	4	
number of turns per slot	12	
stator outer diameter	1.314	m
rotor outer diameter	1.046	m
permanent magnet code	N-38UH	NEOMAX
rotor length	0.440	m
total mass of active part	2409	kg
rated current per phase	2261	A
rated electrical frequency of armature	221.2	Hz
DC resistance per phase	6.7E-04	ohm
terminal voltage line to line	609	V
induced voltage per phase	353	V
synchronous inductance per phase	9.74E-05	Henry
load inductance per phase	-4.87E-05	Henry
avg. electromagnetic torque	21.1	kNm
total power losses	46.9	kW
generator efficiency	0.98	
maximum temperature without fan	118	deg

2.2 회전자와 고정자 설계

고정자는 포스코 전기강판 50PN290을 사용한다. 모든 방향에서 자기적인 특성이 동일한 무방향성이며 대형 발전기 코어에 적합한 0.5 mm lamination 철판이다. 슬롯 모양은 단순한 open 직사각형으로 해서 단면이 사각인 코일 다발을 조립하기 편리하게 했고, tooth 모양은 약간 사다리꼴로 자기장 flux가 원활히 전달되도록 했다. 회전자도 철손을 약간 줄이고 양산품 제작 편의를 위해 laminated steel을 사용한다. 회전자 철판은 50PN510 (S14C) 전기강판을 사용한다. 50PN290에 비해 철손이 약간 더 크지만 가격이 저렴해서 일반적으로 많이 사용된다.

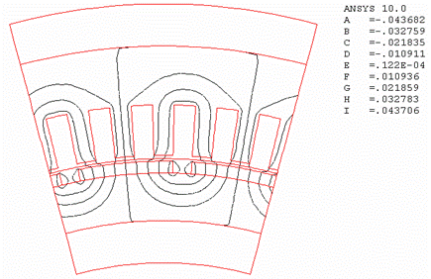
영구자석 특성 중에 remanence, coercivity, 자장 변화 없이 사

용할 수 있는 상한 온도 등을 고려하면서 영구자석의 가격과 수급 여건을 감안해서 선정한다. 발전기에서 영구자석:코일:철의 국내 가격비가 125:11:1 정도이므로 영구자석의 가격이 발전기 전체 가격에 크게 영향을 미친다. 선정된 영구자석은 NEOMAX-38UH로 (typical) Remanence B_r이 1.26 Tesla, Coercivity H_c가 955 kA/m (12 kOersted), 온도 상수는 0.1% per degree, working temperature는 180도 이하이다. 영구자석의 원심력이 중력에 비해 712 배에 달하므로 회전자 표면에서 3 mm 깊이에 영구자석을 삽입하는 형태를 취한다. 영구자석을 관리하고 조립하는데 편리하도록 magnet housing을 이용한다. 그림1에서 알 수 있듯이 지름방향인 원심력을 분산시키기 위해 영구자석 단면을 쐐기 모양으로 만들었다. 영구자석과 housing 사이는 접착제로 보강하며 접착력은 350 kgf /cm^2 이상이라지만, 접착력의 유효기간이 불분명해서 구조적인 안정성이 중요하다.



<그림 1> 삽입형 영구자석 pole과 회전자 형상

영구자석이 회전자 내로 삽입되는 구조로 변경되면서 공극에서 자기장이 약 19% 정도 줄어들었다. 그림2 는 한 pole 주기 모델에서 magnetic flux contour 모양이다.

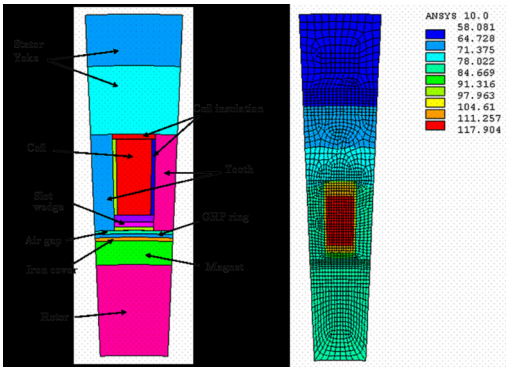


<그림 2> 고정자와 회전자에서 자기장 flux 형상

Slot skew가 없을 경우 open loop 유도전압 형상에는 ripple이 있지만 one slot skew 이후에는 전압 형상이 sinusoidal 모양에 가까워졌고 HVF(harmonic voltage factor)는 4.8×10^{-2}이다.
인덕턴스는 발전기 철 구조, 코일 구조, 전기회로 구조에 크게 영향을 받고 power factor와 단락 시 과도현상에 영향을 준다. 동기인덕턴스는 self 인덕턴스, mutual 인덕턴스, leakage 인덕턴스의 합이 최대인 값으로 했다. 인덕턴스 계산은 주로 ANSYS code를 이용해서 계산했고, 이 결과에는 slot과 air gap leakage 인덕턴스가 포함된 걸로 여기고 end winding leakage 인덕턴스는 따로 계산해서 추가시켰다.
토크 계산은 에너지를 U, 회전자 각도를 θ라 할 때, 토크는 $\tau = dU/d\theta$식으로 Rotor phase 변화에 따른 에너지 변화율로 계산할 수 있다. 토크는 slot opening 크기, skewing 정도, 영구자석의 폭 크기에 밀접하게 관계된다. 회전자 pole pitch에 대한 영구자석의 폭의 비(pole arc ratio)를 50/60로 했을 때 평균 토크는 21.1 kNm이고, 토크 ripple deviation은 0.57 kNm이어서 토크 ripple fraction은 2.7%이다.

2.3 열해석

손실(loss)에는 코일 손실, 철손, 영구자석 손실, additional 손실, friction and windage 손실 등이 있다. 코일 손실에는 ohmic 손실과 자체 eddy current 손실, 외부 자기장에 의한 eddy current 손실이 있다. 철손과 영구자석 손실에는 eddy current 손실과 hysteresis 손실이 포함된다. 발전기 중에서 열이 많이 나는 곳은 코일과 teeth이지만 전기강판의 열전도도가 좋아서 teeth 부분의 온도는 쉽게 전도된다. 반면 코일 면에 수직으로는 열전도도가 낮은 절연물과 공기층으로 감싸져 있어서 슬롯 내에서 발전기의 최고 온도를 나타내고 있다. 적절한 절연을 유지하면서 절연물과 공기층의 두께를 최소화할 필요가 있다.
냉각효과를 높이기 위해 고정자 외각의 모든 면에 water jacket 형식으로 냉각수를 흐르도록 했다. 전체를 4개 circuit로 구성되며 각 circuit는 18개 직선 수로로 되어있다. 총 수로의 수는 72로 발전기 슬롯수와 같다.
발전기 손실, 냉각체계, 냉각방법 등을 고려해서 발전기로 들어오는 냉각수의 온도는 52도이고 발전기에서 나가는 냉각수 온도는 58도로 계산된 결과[2]에 따라 냉각수 온도를 58도로 발전기의 열해석을 했다. 이와 같은 조건하에서 계산 모델과 결과는 그림3으로 코일의 최고 온도는 118도로 나타났다. 발전기의 절연등급은 H 등급으로 180도까지 운전이 가능하나 발전기 수명을 생각해서 될 수 있는 한 최고 온도를 낮추어야 한다. 양산품 철판의 두께는 0.5 mm 보다는 가능하면 0.35 mm로 해서 열손실을 줄일 필요가 있다.



<그림 3> 한 슬롯 주기를 모델로 한 열해석 결과

3. 결 론

기어비 72.28인 기어를 사용하는 2MW 풍력발전기를 설계했다. 회전자 pole pair 수는 12, Armature 회로는 12 병렬이고 인버터 쪽으로 6병렬씩 dual로 공급된다. 회전자 속도가 116 rpm으로 영구자석에 미치는 원심력이 중력의 712배로 매우 커서 영구자석 삽입형 회전자로 설계했다. 전류의 주파수도 221 Hz로 여러 손실을 크게 만드는 요소였다. 냉각 효과를 좋게 하기 위해 고정자 외곽 전면을 water jacker 방식으로 냉각시킨다. 이 경우 코일의 최대 온도는 118도이다. 예상외의 발열에 대비한 공랭용 팬도 설치한다. 경험이 축적되면 영구자석을 회전자에 삽입시키지 않고 회전자 표면에 부착하는 방법을 택해서 영구자석의 효율을 높이고 발전기 크기를 줄일 필요가 있다. 물리 설계하는데 많은 조언을 준 과제주관기관인 (주)유니슨, 발전기 제작사인 (주)보국전기, 인버터 제작사인 (주)플라스포 담당자들에게 감사드린다.

[참 고 문 헌]

[1] 김동언, “800kW 급 영구자석형 동기 발전기의 개념설계” 2003년 보고서
[2] 이홍기, “KBP-2000M 풍력발전기용 영구자석형 동기발전기의 냉각시스템 설계” 포항풍력에너지연구소 내부보고서 2006년
[3] Anders Grauers(1996), "Design of Direct-driven Permanent- magnet Generators for Wind Turbines", CHALMERS UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, Sweden
[4] Miklos Gyimesi, Dale Ostergaard, "Inductance computation by Incremental Finite Element Analysis", IEEE Transactions on magnetics, vol 35, No 3, 1999
[5] Ronghi Qu, "Analysis and modeling of airgap & zigzag leakage fluxes in a surface-mounted-PM machine"
[6] Dr. Peter Thelin, "Design of compact permanent magnet machines for a novel HEV propulsion system", Freddy Magnussen, Electric Vehicle Symposium 20 (EVS), Nov. 2003
[7] Xi Nan and Charles R. Sullivan, PESC, "An improved calculation of proximity-effect loss in high-frequency windings of round conductors", 2003
[8] H. Polinder, M. J. Hoeijmakers, "Eddy-current losses in the segmented surface-mounted magnets of a PM machine", IEE Proc. Electr. Power Appl., Vol 146, No 3, pp. 261~266, May 1999