

KBP-2000M 풍력발전기용 영구자석형 동기발전기의 냉각시스템 설계

이 흥기¹⁾, 김 동언²⁾, 서 형석³⁾, 한 흥식, 정 영규, 이 월우, 박 기현, 정 진화

Cooling System Design of PM Synchronous Generator for KBP-2000M

H.G.Lee, D.E.Kim, H.S.Suh, H.S.Han, Y.G.Jung, W.W.Lee, K.H.Park, C.W.Chung

Key words : Synchronous generator(동기발전기), PM(영구자석), Direct Drive(직접구동), Cooling system(냉각시스템)

Abstract : 포항풍력에너지연구소에서는 에너지 관리공단의 지원으로 2004년부터 풍력터빈 KBP-2000M에 사용될 발전기를 개발해 오고 있다. KBP-2000M에 사용되는 발전기는 기어비가 24인 기어박스를 가진 가변속도형식의 발전기이다. 발전기의 직경은 1.87 m이고 축 방향의 길이는 1.288 m로 영구자석을 사용하여 여자하는 형식으로 설계되었다. 이러한 설계는 풍력발전기에서 요구하는 주요 요구조건인 고효율, 고 신뢰성을 만족시키기 위해서 매우 중요하다. 이 보고에서는 발전기의 물리설계에서 얻어진 사양을 기준으로 하여 열 해석에서 얻어진 열 손실을 이용하여 냉각시스템 설계를 하였으며 펌프 및 라디에이터 선정에 관해서 논의한다.

Nomenclature

D : pipe diameter, m
L : pipe length, m
 ϵ : pipe roughness, m
 μ : dynamic viscosity, Pa · sec
 ρ : density, kg/m³
v : collant speed, m/s
Q : flow rate, liter/min
f : friction factor

Acronym

PM : permanent magnet
WECS : wind energy conversion system
FEM : finite element method

1. 서 론

풍력발전은 대체 에너지로서 세계적으로 활발하게 개발되고 있고 대기 중에 폐열과 공해물질을 방출하지 않을 뿐만 아니라 환경오염이 없는 청정 무공해 에너지를 생산한다는 점에서 큰 관심을 불러일으키고 있다. 신재생 에너지의 중요한 한 축을 담당하고 있는 풍력발전기에 사용되는 발전기는 크게 나누어 증속기를 사용하는 비동기 유도발

전기형과 증속기를 사용하지 않는 직접 구동형이 있다. 두 방법 모두 각자의 장점이 있으며 증속기를 사용하는 형이 시장에서의 주도적 위치를 차지하여 왔으나 점점 증속기를 사용하지 않는 직접 구동형 풍력발전기도 시장점유율을 높여 가고 있다. 이와 관련하여 직접 구동형 발전기에 관련해서 그동안 많은 개발이 국외에서 있었고[1-2], 국내에서도 여러 기관에서 관련 연구가 있어왔고 포항풍력 에너지 연구소에서 800 kW급 발전기를 개발하였다[3-6].

포항풍력에너지 연구소는 (주)유니슨이 주관사 업자로 개발 중인 2 MW WECS에 사용될 영구자석 동기발전기를 설계하였다. 새로이 개발되는 발전기는 2단기어형 가변속도형식으로 영구자석을 사용하여 여자하는 발전기이다. 이런 가변속도형식 발전기의 이점은 컴팩트한 사이즈로 무게 및 가격

- 1) 포항풍력에너지연구소 포항공과대학교
E-mail : lhg@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1817 Fax : (054)279-1399
- 2) 포항풍력에너지연구소 포항공과대학교
E-mail : dekim@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1811 Fax : (054)279-1399
- 3) 포항풍력에너지연구소 포항공과대학교
E-mail : suhhs@postech.ac.kr
Tel : (054)279-1819 Fax : (054)279-1399

측면에서 유리하다. 이 논문에서는 발전기의 물리설계에서 얻어진 사양을 기술하고 열 해석에서 얻어진 열 손실을 이용하여 냉각시스템 설계, 펌프 및 라디에이터 선정에 대해서 기술한다.

2. 발전기의 주요 Parameters

최적화된 발전기를 설계하는 것은 많은 변수들이 개입되어 있으므로 그 parameter 범위가 매우 넓다. 발전기가 축(axial)방향으로 길어지면 공극의 오차가 커지고 영구자석을 삽입하는데 어려워진다. 또한 큰 구조물을 가공하는데 따른 어려움과 비용이 증가된다. 반면 발전기의 지름(radial) 방향으로 커지면 발전기를 타워 바로 위에 설치하지 못해서 발전기와 회전의 사이의 거리가 멀어지는 단점이 생긴다. 지름 방향 크기는 발전기 출력과 적절한 surface force density 등을 고려해서 최적화하였다. 일정한 출력 조건에서 발전기의 active material의 부피는 발전기 반경에 반비례 하므로 발전기 반경을 크게 할수록 발전기 전체의 부피가 줄어든다. 이같이 발전기 전체의 구조와 발전기 제작 과정의 사정을 고려해서 2 MW 발전기의 사양을 결정하였다[7]. 표 1에서는 결정된 발전기의 주요 사양을 기술한다.

3. 냉각시스템 설계

3.1 발전기의 열해석

도체와 stator, rotor에서의 온도상승을 추정

표 1 발전기의 주요 parameter들

PARAMETERS	VALUES
Output power	2 MW
Output line to line voltage	1082 V
Output current	1194 A
Electrical frequency	110.2 Hz
Blade / Rotor rpm	15.3 / 367.2
Gear ratio	24
Number of rotor pole pairs	18
Number of parallel circuits	6
Number of slots	108
Number of conductors / slot	12
Current density	3.41 A/mm ²
Outer length of generator	1.288 m
Outer diameter of generator	1.87 m
Magnet material	Neomax-38UH
Magnet block width	0.085 m
Magnet block thickness	0.014 m
Magnet pole arc ratio	22/40
Joule losses	15.6 kW
Total power losses	40.9 kW
Generator efficiency	0.982

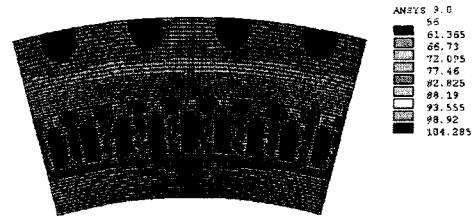


그림 1. 열 해석 결과, Stator Rotor에서의 온도분포. 여기에서는 9 slot당 4개의 cooling channel이 있고 그 coolant의 reference온도는 56 °C라고 가정하였다. 이때 최대 코일온도 상승은 약 48 °C 임.

하기 위하여 상용 FEM code를 사용하는 2D열분석을 수행하였다[8]. Ohmic 손실은 stator slot에 균일하게 분포시켰으며 철손과 기타 손실은 고정자 teeth와 yoke 부분에 각각의 기여분에 따라서 분포시켰다. 철손을 분포시키는 방법에 따른 분석 결과의 민감도를 조사하였으나 분포방법에 따른 최대온도 상승의 변화가 1 °C 이하로 둔감하여 철손의 분포를 개략적으로 하여도 최종결과에는 크게 차이가 없었다. 슬롯단면에서 도체수직방향으로의 열전달율은 순수구리의 1/222로 계산하였다. 이것은 슬롯이 절연물을 포함하는 도체로 이루어진 것을 고려한 것이다. 먼저 라디에이터를 선정하기 위하여 필요한 발전기에서 발생하는 열 손실은 40.9 kW 이다. 이 결과를 이용하여 stator 외부 slot에 냉각 채널을 매설한 상황에서 2차원 FEM 해석을 수행하여 결과를 얻었다. FEM 해석은 stator 의 9 slot 당 4개의 냉각 채널을 매설한 상태에 열 해석을 수행하였으며 해석결과는 그림 1에 나타나 있다. 해석결과 냉각수 입구 온도가 56 °C 일 경우 최대 온도 상승은 104 °C 이다. Radiator에 흐르는 유량에 따라서 Radiator의 냉각능은 변화하는데 Oiltech사의 여러 Radiator 모델에 대한 냉각능은 그림 2에 graph로 나타나 있다[9]. 개략적으로 냉각수량이 300liters/min 일 때 필요냉각 power가 40.9 kW 기준으로 LAC-112-8 Model을 사용할 경우 냉각수 온도상승은 약 16 °C 일 것으로 추정된다. 따라서 공기온도 40 °C 를 기준으로 하였을 때 라디에이터 입구온도는 56 °C이며, 이때 발전기에서의 추정되는 온도상승 48 °C를 감안하면 최대 코일온도는 약 104 °C 일 것으로 추정된다. 그리고 냉각관련 parameter는 표 2에 나타나 있다.

3.2 Coolant pump motor 용량

Coolant의 viscosity에 의한 loss를 무시한다면 순순 유체 토출량과 압력차에 의한 power손실은 1.1 bar, 300 liters/min 기준일 때

$$P = \Delta p \cdot V \quad (1)$$

로 근사적으로 계산될 수 있다. 여기에 viscosity에 의한 loss, 그리고 발전기 냉각채널에 의한 압력손실, 모터의 효율, safety margin 등을 고려하여야 하므로 약 2.0 kW를 냉각수 펌프의 Power 기준으로 삼는다.

펌프선정시 참고로는 먼저 생각할 수 있는 것인 대관령에 설치되어 있는 Jeumont 사의 750 kW

표 2 발전기 냉각관련 Parameter들

Wind Turbine	2 MW
Radiator Model	LAC 112-8
Coolant 형식	ISO VG 46
Coolant Flow	300 liters/min
최대공기온도	40
기준 해발고도	1000 m
냉각수요	40.9 kW
Radiator 입구 냉각수온도	56 °C
Radiator 출구 냉각수 온도	52 °C
공기 출구온도	47 °C
Spec. Heat dissipation	2.53 kW/°C
Pressure Drop	1.1 bar
Air flow	5.20 m ³ /sec
Motor Capacity	2.20 kW
LpA, 1m (소음)	83 dB(A)
Protection Standard	IP 55
Cooling 면적	1.1 m ²
Weight	168 kg

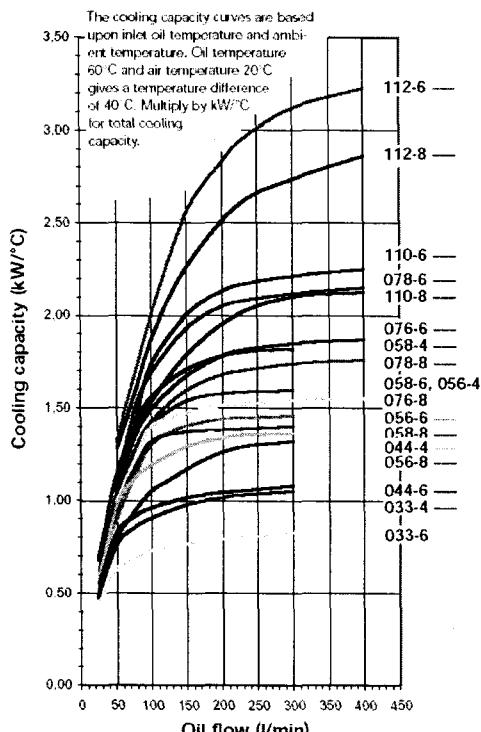


그림 2 Oiltech사의 여러 가지 방열판 모델의 유량에 따른 냉각능. 여기서 Oil flow는 coolant flow rate를 말함.

system이다. Jeumont사의 750 kW wind turbine에 설치되어 있는 펌프는 GRUNDFOS 사의 CHI12-15A 모

델이다. CHI 모델의 펌프는 산업용 다단 원심 펌프로 저소음으로 적용분야가 다양하여 산업용 세척시스템, 급수가입시스템, 냉난방시스템 및 공조시스템에 사용된다. 양정 65 m 일 경우 최대유량은 16 m³/h이며 사용온도는 -15 °C ~ +110 °C 범위이며 최대 사용압력은 10 bar이다. 상기 기준을 적용하여 2 MW 용 발전기에 적용하기에는 모든 사양이 기준에 미달한다. 좀 더 고용량의 펌프를 선정하기 위하여 펌프의 성능 및 적용분야는 비슷한 입형 다단 원심펌프를 선정하였다.

GRUNDFOS 사의 CRN 모델을 선정하여 유량, 사용온도 및 압력을 검토한 결과 만족할 만하였다. 선정한 펌프는 CRN15-2 모델로 양정 34 m 일 경우 최대유량은 18 m³/h이며 사용온도는 -15 °C ~ +120 °C 범위이며 모터 과워는 3.0 kW이다. 아래 그림 3은 CRN15-2 펌프의 유량과 압력특성 곡선을 나타낸다.

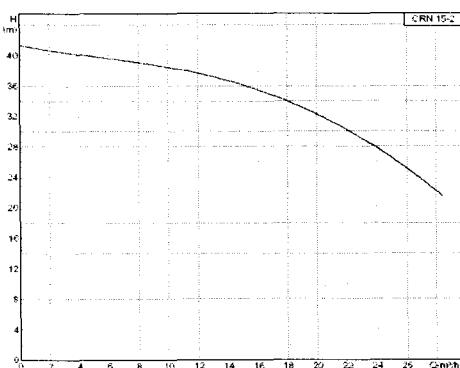


그림 3 CRN15-2 펌프의 유량과 압력특성 곡선

3.3 냉각채널 설계

냉각채널 설계 시 필요한 주요 압력손실은 냉각채널에서의 압력손실, 벤딩 부위에서의 압력손실 및 라디에이터에서의 압력손실 등을 구할 수 있다.

냉각채널에서의 압력손실:
직선 원통 관에서의 압력손실은

$$\Delta P_1 = f \frac{L}{D} \frac{1}{2} \rho V^2$$

(2)

이다. 여기서 f 는 friction factor로 Reynolds number와 pipe의 거칠기를 알면 Moody chart로부터 구해진다. 한편 L 은 냉각수로의 길이 D 는 냉각수로의 직경, ρ 는 냉각수의 밀도, V 는 냉각수의 속도이다.

Reynolds number는 다음과 같이 정의된다.

$$R_e = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (3)$$

Reynolds number 2000-3000을 경계로 pipe에서는 laminar flow와 turbulent flow의 경계로 삼는다. 윗 식에서 μ 는 냉각수의 dynamic viscosity이다. 냉각채널 내부의 거칠기와 냉각 시스템의 Reynolds number와 Moody chart에서 friction

factor를 구할 수 있다.

Bending 부위에서의 압력손실:

냉각 채널이 90도 벤드 되어 있을 때의 압력손실은 다음과 같은 실현식으로 주어진다.

$$\Delta P_2 = K \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (4)$$

Bending radius와 냉각채널 내경의 비가 약 5.5

일 때 ($\frac{R}{d} \approx 5.5$) 180도 벤드 되어 있는 관의 K는 약 0.4로 추정할 수 있다.

Radiator에서의 압력손실:

Radiator에서는 300 liter/min의 유량이 흐를 때 약 110 kPa의 압력손실이 있는 것으로 계산된다. 따라서 일반적인 유량 Q에서의 압력손실은

$$\Delta p_3 = 110 \text{ kPa} \left(\frac{Q[\text{ls}/\text{min}]}{300} \right)^2 \quad (5)$$

로 추정한다.

이 세 가지 종류의 압력손실을 모두 합한 것이 펌프의 압력과 같아지도록 유속은 정해진다.
즉

$$P(\text{pump}) = \Delta p_1(v) + \Delta p_2(v) + \Delta p_3(v) \quad (6)$$

가 되도록 유속을 정한다. 특정한 v를 가정 하였을 때 압력손실의 합이, 주어진 유량에서 펌프의 압력과 같도록 v를 정한다. 좀 더 상세하기에는 v에 따라 Re가 변하고 friction factor가 변해서 몇 번의 iteration이 필요하겠지만 friction factor가 Re의 변화에 대해서 완만하게 변화하기 때문에 쉽게 구하는 유속을 추정 할 수 있다. 다음 표 3에서는 냉각 채널이 12일 경우 압력손실과 유량을 나타내었다. 설계된 길이는 3.84 m인데 이 경우는 순수히 발전기 부위의 냉각채널

표 3 냉각 채널이 12일 경우 압력손실과 유량

Parameter	Value
Number of Circuit	12
D	0.01 m
L	3.84 m
ϵ	0.15×10^{-4} m
ϵ/D	0.0015
μ	9.50×10^{-4} Pa sec (at 71C)
ρ	1070 kg/m ³
v	5.33 m/sec
Q	300 liter/min
Re	6.00×10^4
f	0.024
Δp (pipe)	1.40×10^4 Pa
Δp (180 bending)	4.86×10^4 Pa
Δp (Radiator)	1.11×10^6 Pa
ΔP (total)	3.00×10^6 Pa

만 고려한 경우이며 냉각수량은 300 liters/min 이었다. 실질적으로 발전기 외부의 입, 출구 냉각관을 고려하면 조금은 유량이 적게 나올 것이다. 입, 출구 채널당 3 m를 고려하여 계산을 하면 한 채널당 길이는 6.84 m이며 이 경우 유량은 287 liters/min 으로 추정된다. 실제적으로 발전기에 냉각라인이 설치될 경우 이렇게 길이가 길지는 않을 것이다. 또한 전체적인 냉각회로에서의 압력손실은 설치될 벨브, 메니폴드 및 연결부위 등에서 압력손실이 있으므로 압력손실은 계산치보다 조금은 높을 것으로 추정한다.

4. 결 론

이 논문에서는 에너지 관리공단의 지원으로 (주) 유니슨이 주관하여 개발 중인 2 MW 풍력발전기 (KBP-2000M)에 사용되는 영구자석형 RFPM 발전기에서 냉각시스템 설계에 대해서 기술하였다. 발전기 물리설계에서 얻어진 결과를 이용하여 냉각시스템 설계에 적용하였으며 최종적으로 제품이 제작 조립된 후 성능 테스트를 시행하여야 한다. 유량은 외부의 냉각관 길이 및 배관의 배치에 따라 조금은 달라진다. 유량 측정, 압력손실 및 온도 상승 등을 확인하여 설계 값과 측정 값을 비교하여야 한다.

(참 고 문 헌)

- [1] A. Grauers, "Design of Direct-driven Permanent magnet Generators for Wind Turbines", Phd Thesis, Chalmers University of Technology, 1996.
- [2] Petri Lampola, "Directly Driven, Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Wind Power Applications", Phd Thesis, Helsinki University of Technology, 2000.
- [3] 황돈하 et al., "영구자석형 풍력발전기 설계 및 정상상태 전자제어", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환시스템 학회 춘계학술대회 논문집, pp. 6~8, 2002.4
- [4] D.H.Kang, P.Curiac, Ju Lee, "An Axial Flux Interior PM Synchronous Machine", ICEM 2000 Vol 3, 2000.
- [5] 김동언. et al., "소형 20kW급 영구자석, 직접구동형 발전기의 개발", 대한전기학회 하계 학술대회 논문집, pp. 1398~1400, 2003.7
- [6] 김동언 et al., "800 kW급 영구자석형 동기발전기의 개념설계", 포항풍력에너지 연구소, 포항공대, 2003.11
- [7] H.S. Suh et al., "Physical design of the 2MW Generator FOR KBP-2000M", European Wind Energy Conference and Exhibition 2006
- [8] ANSYS, <http://www.ansys.com>
- [9] Oiltech, <http://www.oiltech.se>