

전자장해석을 이용한 풍력발전용 전력 케이블의 전자기적 고찰

김 지현¹⁾, 조 성호²⁾, 이 인우³⁾

Finite Element Analysis of Power Cables for Wind Turbine Application

Jihyun Kim, Sungho Cho, Inwoo Lee

Key words : Wind turbine(풍력 발전), Finite element analysis(유한요소해석), Cables(케이블), Eddy current losses(와전류 손실), Electric field strength (전계강도)

Abstract : This paper presents electromagnetic finite element analysis of power cables for wind turbine application. Eddy current losses are calculated due to high currents along metallic part, and dielectric strength on power cables is investigated for case study, which suggests the optimal cabling configuration for wind turbine construction.

Nomenclature

E : electric field strength, V/m
 H: magnetic field intensity, A/m
 A: vector potential, wb/m
 B: magnetic flux density, T
 Φ : magnetic flux, wb
 σ : electric conductivity, S/m
 J: current density, A/m²
 μ_0 : permeability of air, $4\pi \times 10^{-7} H/m$
 μ_r : relative permeability of object
 ω : angle frequency of current, rad/s
 δ : skin depth of conductor, m
 ϕ : electric potential
 ϵ_0 : permittivity of air, $8.854 \times 10^{-12} F/m$
 ϵ_r : relative permittivity
 ρ : volume charge density, C/m³
 D: diameter of conductor, mm
 t: thickness of metallic parts, mm
 W: inner width of metallic parts, mm
 H: inner height of metallic parts, mm
 L :inner length of metallic parts, mm
 d_{c.c}: center to center distance of conductors, mm

subscript

FEM : finite element method
 DFIG : doubly fed induction generator

1. 서론

국내 신재생에너지 및 친환경에 대한 관심의 증대와 더불어 풍력 발전에 관한 연구가 활발히 진행 되고 있으나 유럽 등의 국가에 비해 국내의 풍력시스템 및 요소기술의 수준 및 경험이 상대적으로 낮다. 풍력 발전 시스템은 그 정격이 수백 V급의 저전압에 수백~수천A의 대 전류 특징을 가

-
- 1) (주)효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : lovemiho@hyosung.com
Tel : (055)268-9924 Fax : (055)268-9926
 - 2) (주)효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : motor21@hyosung.com
Tel : (055)268-9923 Fax : (055)268-9926
 - 3) (주)효성 중공업연구소 회전기팀
E-mail : inlee@hyosung.com
Tel : (055)268-9921 Fax : (055)268-9926

지며, 발전시스템의 요구용량이 커짐에 따라 전류도 증가하는 추세이다. 전류의 증가로 인해 전력용 케이블 근처의 금속 지지구조 및 덕트에서의 와전류 손실이 증가하게 되고 케이블 길이가 길어짐에 따라 DFIG 발전기의 인버터단의 스위칭으로 인한 과도전압의 발생으로 인해 절연문제가 발생될 수 있으므로⁽¹⁾ 정량적인 검토를 통해 전력케이블의 구성하여야 한다. 본 논문은 풍력발전용 전력케이블 구성 사례별 와전류손실을 계산하고 절연해석을 통해 최적안을 선정하여 제작에 반영하도록 하였다. 와전류 손실 및 전계 계산에는 Maxwell 2D 및 3D ver 10을 이용하여 전자장 유한요소해석(FEM)을 수행하였다.

2. 풍력발전용 전력케이블

2.1 풍력발전용 전력케이블 요구사항

풍력발전용 전력케이블은 일반 송전용 전력케이블과 다르므로 다음과 같은 요구사항을 만족해야 한다.

1) 내후성

타워의 설치장소를 고려하여 케이블 사양을 선정하여야 하며, 육상 설치의 경우 고지대에서는 하절기 및 동절기의 온도의 차가 매우 크므로 내후성이 강한 절연 케이블을 사용하여야 한다.

2) 유연성 (flexibility)

Yaw시스템에 의해 발전기 너셀(naselle)이 회전하여 케이블이 꼬이게 되는데 이를 고려해 케이블이 충분히 유연하여야 하며 너셀 내부 발전기에서 타워까지 케이블 인출을 효과적으로 하기 위해 곡률이 작아야 한다.

3) 단락전류 (short circuit current)

단락 시 단락전류에 의한 온도상승에 충분히 견딜 수 있어야 한다.

2.2 풍력발전용 전력케이블 구조

풍력발전용 전력케이블은 설치조건 및 구성 방법에 따라 구조가 다양해질 수 있으나 일반적으로 Fig. 1과 같이 크게 3부분으로 나눌 수 있다.

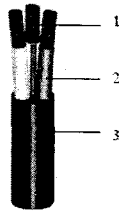


Fig. 1 풍력발전용 전력케이블 구조

1) 도선(core)

케이블의 용량에 따라 1 core에서부터 여러 core까지 구성될 수 있으며, 유연성을 고려하여 core가 소선으로 구성되어 있다.

2) 절연물(insulation)

경우에 따라 3상의 전압이 한 케이블에 연결되도록 구성할 수 있으므로 각 상전압에 대해 절연이 충분히 견딜 수 있어야 한다.

3) 시스(sheath)

외부 화학적, 기계적인 충격에 견딜 수 있어야 하며 유연성을 보장할 수 있어야 한다.

3. 풍력용 전력케이블의 전자기적 검토

케이블에 흐르는 전류는 케이블을 중심으로 자장을 형성하게 되고 이 자장 부근의 금속구조물은 와전류가 유도가 되고 이에 의해 와전류 손실을 야기 시킨다. 또한 타워로부터 계통까지의 거리에 인해서 케이블이 수십m로 길어지게 되고 인버터 스위칭에 의해 이 케이블에 정격전압보다 높은 전압이 생성되므로 절연강도에 대한 검토가 필요하다. 본 연구에서는 3차원 전자장 해석법을 이용하여 케이블 구성에 따른 와전류(eddy current analysis)해석을 수행하였고, 케이블 구성 단면의 대칭성을 이용하여 2차원 정전계 해석(electrostatic analysis)을 수행하였다.

3.1 지배방정식

맥스웰 방정식에서 교류자장의 와전류 문제를 풀기위해 식 (1) 및 식 (2)를 이용한다.

$$\nabla \times H = J \quad (1)$$

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (2)$$

와전류가 발생하는 도체 영역에서는 H(t)는 입력전류 및 인가자계로부터 식(3)에 의해 구해지고, 그 외의 영역에서는 자기 스칼라 포텐셜 ϕ 로부터 식(4)에 의해 계산된다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times H \right) = j\omega\mu H \quad (3)$$

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \phi) = 0 \quad (4)$$

도체의 와전류에 의한 손실은 식(5)와 같다.

$$P = RI^2 = \frac{1}{\sigma} \int_V J \cdot J \cdot dV \quad (5)$$

도체의 침투 깊이는 식(6)과 같다.

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\sigma\mu_0\mu_r}} \quad (6)$$

한편, 맥스웰 방정식에서 전계문제를 풀기위해 식(7)을 이용한다.

$$\nabla \cdot (\epsilon_r \epsilon_0 \nabla \phi) = -\rho \quad (7)$$

3.2 해석 조건 및 방법

도체의 와전류 손실을 계산하기 위해 다음과 같은 사항을 가정한다.

1) 해석대상은 해석영역 외부로부터 자계의 영향을 받지 않는다. (Neumann 경계조건)

2) 부하전류는 고조파 성분이 없는 정현파 전류이다.

3) 재질의 비유전율 및 비투자율은 선형이라고 가정한다.

4) 도체(구리)의 와전류 손실은 본 계산에서 고려하지 않는다.

해석에 사용된 재질의 전기적 특성치는 Table

1과 같다.

Table 1 본연구에 사용된 재료의 전기적 특성

재료	ϵ_r	μ_r	σ	비고
copper	1	1	5.8e7	도체
cast iron	1	60	1.5e6	구조물
stainless	1	1	1.1e6	구조물
rubber	3	1	1e-15	절연물

전력케이블에 의한 금속 구조물의 와전류 손실은 전류의 세기, 전력케이블의 상수, 금속 구조물의 형태, 금속 구조물의 전기적 특성, 전력케이블과 금속 구조물의 상대적인 위치에 따라 달라지게 된다. Table 2와 같은 사례연구 (case study)를 통해 얻어진 결과를 상호 비교하여 케이블 구성안을 도출하였다.

Table 2 사례 연구를 위한 해석 조건

번호	상수	케이블배열	금속재료	케이블위치
1	1	단일	iron	덕트내부
2	3	삼각형		
3	3	평행		
4	1	단일	stainless	
5	3	삼각형		
6	3	평행		
7	1	단일	iron	평판상부
8	3	삼각형		
9	3	평행		
10	1	단일	stainless	
11	3	삼각형		
12	3	평행		
13	1	단일	iron	평판통과
14	3	삼각형		
15	3	평행		
16	1	단일	stainless	
17	3	삼각형		
18	3	평행		

여기서 케이블 배열 및 위치를 Table 3에서 정의하였다.

Table 3 케이블 위치 및 배열

케이블배열		케이블위치	
단일 (단상)	 D: 37, L: 100	덕트 내부	 W: 100, H: 80, L: 90
삼각형 (상상)	 d_c $d_{c-c}: 30$	평판 상부	 W: 160, H: 90, L: 90
평행 (상상)	 d_c $d_{c-c}: 30$	평판 통과	 W: 100, H: 80

단상케이블의 경우 도선에 60Hz의 정격전류를 인가하였으며, 삼상케이블의 경우 도선에 전류를 각각 120도 위상차를 주고 인가하였다. 금속재료의 두께는 모든 경우에서 2mm로 모델링 하였다.

3.3 해석결과

3.3.1 와전류 손실 계산

3.2절의 Table 2와 같이 각 조건별 총 18회 사례 해석을 통하여 계산된 케이블 위치별 손실은 각각 Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4와 같다.

여기서, 손실을 케이블 위치별로 구분하여 종합한 이유는 케이블 위치에 따른 금속 구조물의 형상, 부피 및 도체와의 상호 위치가 서로 틀리므로 동등한 수준에서의 비교 대상이 될 수 없다. 또한 계산된 와전류 손실 값은 상호 비교를 위해 정규화 시켜서 무 차원으로 표현했다.

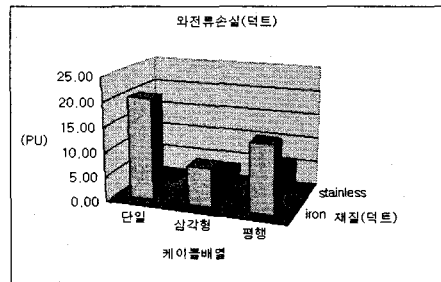


Fig. 2 덕트의 와전류 손실(번호 1-6)

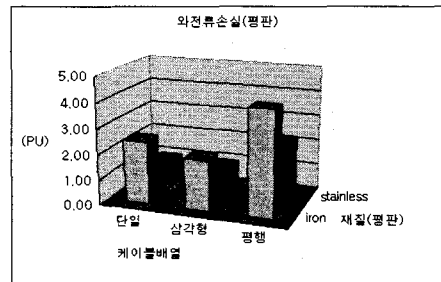


Fig. 3 평판의 와전류 손실(번호 7-12)

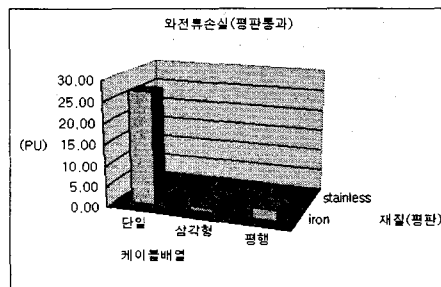


Fig. 4 평판통과시 와전류 손실(번호 13-18)

Fig. 2-4의 결과를 종합해 보면 stainless의 재료에 삼각형 케이블배열이 손실을 최소화 할

수 있을 것으로 추론할 수 있다. 삼각형 케이블 배열로 인해 120도 위상차가 나는 3상전류에 의한 3상 자속의 합이 0가 되고 남은 누설 자속분만 금속 구조물에 영향을 주는 것이며, 케이블을 평행하게 배열하는 것 보다 더욱더 효과적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 특히 케이블 단자함(junction box)과 같이 평판을 통과하는 경우 stainless 재질을 사용하는 것이 와전류를 줄이는데 효과적이며, 표피두께(skin depth)를 고려해 설계를 하여야 하며, 각 금속구조물과의 절연 및 접지에 대한 고려가 있어야 된다. 단일 케이블과 같이 케이블이 각상에서 멀리 떨어져 있는 경우 손실이 매우 크게 발생할 가능성이 있으므로, 케이블 배열의 선택의 기준에서 제외해야 할 것으로 사료된다.

3.3.2 전계 강도 계산

3.3.1절에서 사례연구를 통해 와전류 손실계산을 수행하였으며, 이 때 케이블에 걸리는 전계를 계산하여 절연 강도를 계산하였다. 일반적으로 고무의 절연내력은 12MV/m로 알려져 있으며, 이를 해석대상의 절연 파괴 기준치로 삼았다. 3상에 대한 전계해석에서, 각 상에서 전압차(potential difference)가 가장 클 경우, 즉 A상의 전압이 최대가 되고, B 및 C상이 A상 전압의 -0.5배가 되는 점을 최대의 전계가 걸리는 조건이 되며, 가장 최대의 전계가 예상되는 케이블 구성은 삼각형 배열에다 3상 케이블이 Fig. 5와 같이 거리가 없는 조건이 된다. 이때 절연물의 두께는 1.85mm이다.

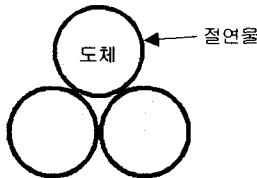


Fig. 5 최대전계 발생 케이블 배열

해석모델의 대칭성을 이용하여 2차원 정자장 해석을 수행하였으며 케이블 간 절연물(고무)의 전계를 계산하였으며, Fig. 6과 같이 절연물에서 1.3MV/m의 최대전계가 걸리게 된다. 케이블의 길이가 수십m로 길어질 경우 인버터 스위칭의 과도전압으로 인해 케이블에 걸리는 과도전압을 정격전압에 대해 2배정도로 가정을 하면, 최대 전계는 2.6MV/m이 되고, 362%의 절연여유를 가지므로 절연상의 문제는 발생하지 않을 것으로 사료된다.

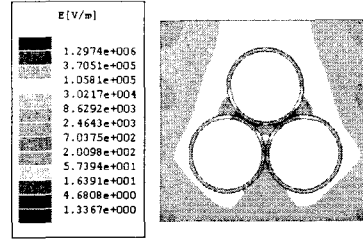


Fig. 6 삼각형 배열 케이블의 전계 분포도

4. 결론

본 논문에서 전자장해석을 이용하여 사례연구를 통해 적절한 케이블 구성을 다음과 같이 도출하였다.

- 1) 와전류 손실에 가장 적은 영향을 주는 구조는 삼각형 케이블 배열 구조이며, 이는 상호자속은 케이블에서 서로 상쇄가 되고 누설자속이 최소로 되기 때문이다.
- 2) 금속 구조물을 관통하는 구조에서는 비자성체가 적절한 선택이며, 손실을 최소화하기 위해 금속 구조물 간 절연 및 접지를 고려하여야 한다.
- 3) 삼각형 케이블 구조의 경우 과도전압을 고려하더라도 300%이상의 절연여유가 있으므로, 절연파괴는 일어나지 않는다.
- 4) Stainless 재질을 금속 구조물을 사용한다고 해서 반드시 손실이 최소화 되는 것은 아니고, 재질의 침투깊이 (skin depth)에 따라 달라질 수 있으므로 재질의 선정에 검토가 필요하다.

References

[1] 이창화, 2001, “인버터 구동 저압 유도전동기 고정자 권선의 전압분포에 관한 연구”, 학위논문, 57-58