

최대 연간 에너지 생산을 위한 영구자석형 풍력발전기의 최적설계

論 文
56-12-9

Optimal Design of Permanent Magnet Wind Generator for Maximum Annual Energy Production

鄭昊彰* · 鄭相龍** · 韓鏗鎭*** · 李哲均†
(Ho-Chang Jung · Sang-Yong Jung · Sung-Chin Hahn · Cheol-Gyun Lee)

Abstract - The wind generators have been installed with high output power to increase the energy production and efficiency. Hence, Optimal design of the direct-driven PM wind generator, coupled with F.E.M(Finite Element Method) and Genetic Algorithm(GA), has been performed to maximize the Annual Energy Production(AEP) over the whole wind speed characterized by the statistical model of wind speed distribution. Particularly, the parallel computing via internet web service has been applied to loose excessive computing times for optimization. The results of the optimal design of Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator(SPMMSG) are compared with each other candidates to verify the usefulness of the maximizing AEP model.

Key Words : Annual Energy Production(AEP), Genetic Algorithm(GA), parallel computing, PM wind generator, Finite Element Method(F.E.M)

1. 서 론

풍력 발전 시스템은 운전방식에 따라 증속기(Gear box)를 갖는 경우와 갖지 않는 경우인 직접 구동(Direct-drive)형으로 나누어진다 [1]. 증속기를 갖는 풍력발전 시스템의 경우 증속기로 인해 많은 기계적 손실이 발생되며 풍력 발전 시스템의 수명이 단축되는 단점을 지니고 있으므로, 최근의 풍력 발전 시스템은 고효율, 고성능 관점에서 직접 구동형이 많이 채택되고 있다. 직접 구동형 풍력 발전 시스템의 발전기는 저속에서 운전되어 상대적으로 높은 토크밀도를 가져야 하므로 고 토크밀도와 고효율의 특성을 가지는 다극 영구자석 동기발전기가 주로 사용된다 [2],[3]. 따라서 본 논문에서는 풍력 발전 시스템에 적용될 발전기로 표면부착형 영구자석 동기 발전기(Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Generator, SPMMSG)을 선정하였다.

일반적으로 풍력발전기의 설계의 목적으로는 정격 풍속에서의 출력 특성이나 재료비 등이 선택되어 왔다 [3],[4]. 하지만 풍력 발전시스템은 정격풍속에서만 운전되는 것이 아니므로 운전 풍속 영역 모두를 고려하여야 한다 [5].

운전 풍속 영역을 고려하는 방법으로 Grauers[6]은 정격 풍속에서 발전기의 손실을 기준으로 하여 각 풍속에서의 손실 비례계수를 구할 때 풍속분포를 고려하는 방법을 사용하

고 있다. 그러나 그 계산법이 복잡하여 실용적이지 못하다. Inoue[7]는 풍속 확률분포 함수로서 Weibull function을 사용하고 있으나 이 경우에는 발전기가 설치되는 지역의 풍속 분포에 대한 자세한 데이터 shape factor와 scale factor 등을 필요로 한다. 본 논문에서는 운전 풍속 영역 모두를 고려하는 방법으로 풍속 확률밀도 함수로는 발전기가 설치되는 지역의 평균 풍속만 알고 있는 경우에도 적용이 가능한 Rayleigh 함수를 사용하여 연간 에너지 생산량(Annual Energy Production, AEP)을 계산하는 방법을 사용한다. 풍력 발전 시스템을 설치하는 궁극적인 목적이 에너지 생산에 있으므로 풍력발전기의 설계의 주요 목적으로 연간에너지 생산량을 선정하는 것이 타당하다고 할 수 있다.

이러한 풍력발전기를 설계하고자 할 때 설계자의 원하는 사양이 여러 가지 존재하는 경우 동시에 이를 만족하기 위해서는 설계자의 경험에 의존하는 설계보다는 최적화 알고리즘을 도입한 최적 설계가 필요하다. 본 논문에서는 최적화 기법으로 널리 사용되고 있는 유전알고리즘(Genetic Algorithm)을 사용하였다 [8]. 유전 알고리즘의 목적 함수로 사용되는 발전기 제반 특성을 계산하기 위해 유한요소법(FEM)을 사용하는 경우 유전알고리즘의 특성상 많은 반복 계산이 필요하므로 과도한 연산시간이라는 문제가 발생한다. 따라서 최적설계시에 발전기의 특성 해석 방법으로 유한요소해석법을 사용하는 것이 현실적으로 불가능하다. 이러한 과도한 연산시간이라는 문제를 해결하기 위하여 반복 계산이나 명령 실행부분을 병렬 처리함으로써 수행시간을 절감하는 병렬 컴퓨팅 기법이 사용될 수 있다 [9]. 그러나 기존의 하드웨어적인 방법은 고가의 병렬 컴퓨터(parallel or vector computer)를 사용하여야 하는 단점이 있으므로 인터넷에 연결되어 있는 사용가능한 컴퓨터들을 통해 연산이나 데이터 처리 부분을 병렬화 하는 인터넷 분산 컴퓨팅

* 學生會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 碩士課程
** 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 助教授 · 工博
*** 正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
† 교신저자, 正會員 : 東義大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博
E-mail : cglee@deu.ac.kr
接受日字 : 2007年 8月 14日
最終完了 : 2007年 11月 5日

(Internet Distributed Computing)이 제안되고 있다 [10],[11]. 인터넷 분산 컴퓨팅은 메인 컴퓨터와 서버 컴퓨터와의 데이터 교환을 internet web 서비스를 통해서 구현하는 것이다. 본 논문에서는 이러한 인터넷 분산 컴퓨팅을 최적화 알고리즘과 결합하여 유한요소 해석을 사용하는 풍력발전기의 최적설계 수행시간을 단축시켰다 [12].

이와 같이 제안된 방법을 통해 풍력 발전기의 최적설계를 수행하고 기존모델 및 효율최대화를 목적함수로 하는 설계결과와 출력, 에너지생산량, 효율 측면에서 비교 검토하여, 제안한 최적설계 방법의 타당성과 효용성을 확인하였다.

2. 풍력 발전 시스템

2.1 풍력에너지의 특성

공기 중에 질량 $m[\text{kg}]$ 이 속도 $v[\text{m/s}]$ 로 이동 할 때 운동에너지는 SI 단위 상으로는 식(1)과 같다.

$$\text{kinetic Energy} = \frac{1}{2}mv^2 \quad [\text{joules}] \quad (1)$$

그리고 바람에 의한 동력(Power) P_w 는 단위 시간당 운동에너지의 변화량이 되므로, 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot (\text{mass flow rate per second}) \cdot v^2 \quad [\text{W}] \quad (2)$$

단위시간에 대한 공기의 부피변화는 $A \cdot v[\text{m}^3/\text{s}]$ 이며, 질량 변화는 $\rho \cdot A \cdot v[\text{m}^3/\text{s}]$ 가 되므로 P_w 는 다음과 같다.

$$P_w = \frac{1}{2}(\rho v A)v^2 = \frac{1}{2}\rho A v^3 \quad [\text{W}] \quad (3)$$

여기서, ρ : 공기밀도 $[\text{kg}/\text{m}^3]$, A: 블레이드 통과면적 $[\text{m}^2]$.

풍력 P_w 는 터빈에 의해 기계적인 동력으로 변환되는데 그 변환 효율을 출력계수 C_p 라고 한다. 터빈의 이상적인 회전율의 경우 즉, 각 운동량의 변화가 없고 터빈 끝의 간섭흐름이 없는 경우 출력계수 C_p 는 이론적으로 0.593이다. 그러나 실제의 경우 출력계수는 공기의 점성과 회전자 끝의 간섭 흐름 등 여러 가지 원인에 의해서 설계와 운전 상태에 따라 달라진다. 이러한 출력계수(Power coefficient) C_p 를 적용하면 바람으로부터 얻을 수 있는 동력 P_s 는 식 (4)와 같다 [1].

$$P_s = \frac{1}{2}\rho A v^3 C_p \quad [\text{W}] \quad (4)$$

실제 풍력 발전 시스템의 운전 시에는 시스템의 기계적 관성·마찰 및 전기적 손실 등에 의해 시동풍속(Cut-in speed) v_c 이상의 풍속에서만 시스템의 출력이 생산되기 시

작하고 정격풍속까지는 v^3 에 비례하여 출력을 나타내게 된다. 그리고 정격 풍속 v_r 부터 정지 풍속(Cut-out speed) v_f 까지는 시스템의 출력이 정격출력으로 일정하게 유지되도록 한다. 이러한 정격출력의 일정한 유지는 터빈의 날개 각도를 변경하는 즉 피치제어(pitch control)시스템을 통하여 이루어지며 터빈의 출력계수 C_p 가 조정되게 된다. 풍속이 정지풍속 v_f 이상이 되면 터빈의 파손방지나 내부시스템의 안정을 위하여 공회전상태가 되어 더 이상 발전을 하지 않는다. 그림 1은 본 논문에서 사용될 풍력 발전 시스템의 출력 특성을 나타내고 있다.

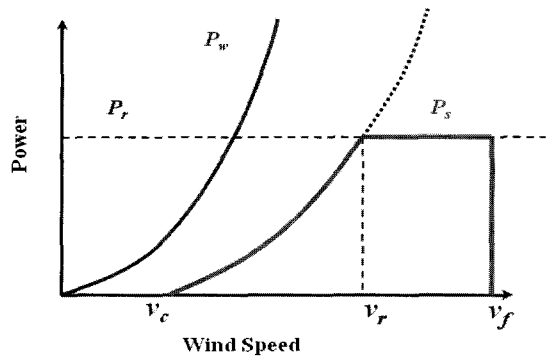


그림 1 풍력 발전 시스템의 출력 특성

Fig. 1 Output characteristics of a power wind generation system

2.2 풍력 시스템의 구성

본 논문에서 설계할 영구자석 풍력발전기가 사용 되는 풍력 발전 시스템의 구성 및 사양을 표 1에 나타내었다. 시스템의 운전방식은 증속기가 없는 직접 구동방식이며, 피치제어를 통하여 발전기의 출력량을 제어한다.

표 1 풍력 발전 시스템 사양

Table 1 SPECIFICATION OF WIND GENERATION SYSTEM

정격 출력 (P _s)		500[kW]
설계 속도	컷 인(Cut-in) 속도	3.5 [m/s]
	정격 속도	13.5 [m/s]
	컷 아웃(Cut-out) 속도	26 [m/s]
발전기	형 식	SPMSG
터빈 회전기	외 경	39 [m]
	회전 속도	0~32 [rpm]
	블레이드 통과 면적 (Blade swept area)	1207[m ²]
제어 시스템	피치 제어(Pitch Control)	

3. 풍력 발전기의 최적설계

3.1 풍력 발전기의 출력전류 산정

본 절에서는 풍력 발전시스템 터빈의 출력식과 SPMSG의 특성식을 이용하여 각 풍속에 따른 발전기의 출력전류를 계산하고자 한다. 본 연구에 적용되는 풍력 발전시스템의 출력계수 C_p 는 그림 2에 나타내었다. 출력계수 C_p 를 이용하여 구한 터빈의 출력 P_s 도 같이 나타내었다. 그림 3는 풍력 터빈의 주속비(tip speed ratio)와 출력계수 C_p 의 관계를 보여준다 [13].

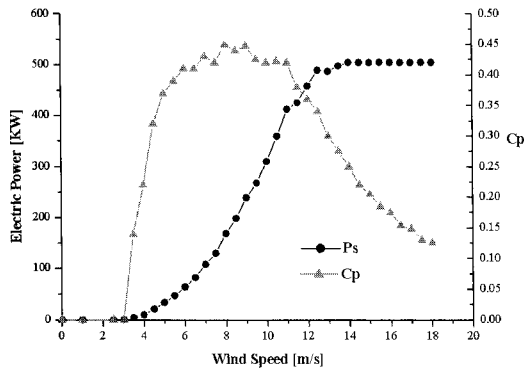


그림 2 출력곡선과 출력계수
Fig. 2 Power curve and power coefficient

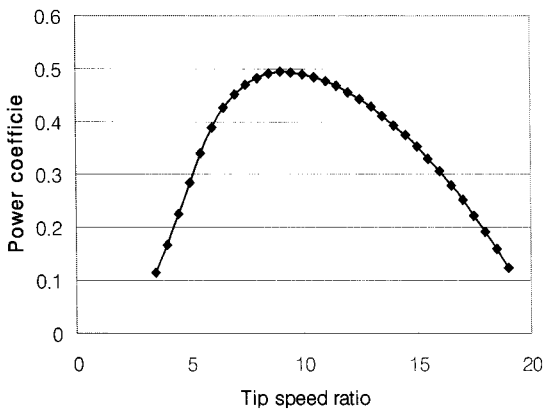


그림 3 풍력터빈의 성능 곡선
Fig. 3 Performance curve of wind turbine

풍력 발전기 SPMSG의 입력 P_i 는 다음과 같다.

$$P_i = \omega T \quad [W] \quad (5)$$

여기서, ω : 각속도 [rad/s], $T = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q$: 토크[Nm],

$\lambda(v) = \frac{R\omega}{v}$: 주속비(tip speed ratio), λ_{pm} : 극당 채교자속수, p : 극 쌍수, R: 터빈의 반경.

식 (5)를 다시 쓰면, 발전기의 입력은 다음과 같게 된다.

$$P_i = \frac{3}{2} p \lambda_{pm} i_q \frac{v \lambda(v)}{R} \quad [W] \quad (6)$$

증속기를 사용하지 않는 직접 구동 풍력 발전 시스템의 터빈에 의한 출력 P_s 는 풍력 발전기의 입력(P_i)과 같으므로, 식 (4)와 식 (6)으로부터 풍력 발전기 출력전류는 다음과 같다.

$$i_q = \frac{1}{3} \frac{\rho A R}{p \lambda_{pm} \lambda(v)} C_p(v) v^2 \quad [A] \quad (7)$$

블레이드 통과면적과 반경사이의 관계식 $A = \pi R^2$ [m²]을 식 (7)에 대입하면 최종적으로 풍력 발전기 출력전류는 다음과 같다.

$$i_q = \frac{1}{3} \frac{\rho \pi R^3}{p \lambda_{pm} \lambda(v)} C_p(v) v^2 \quad [A] \quad (8)$$

출력계수(C_p)와 주속비(λ)는 풍속의 함수이므로 그림 2와 3을 이용하여 구한다. 이러한 출력전류로부터 발전기의 특성해석을 수행하여 발전기의 손실인 동손과 철손을 계산하고 발전기의 출력 P_o 를 계산할 수 있게 된다 [6],[14].

3.2 풍속 확률밀도

풍력발전 시스템이 설치되는 특정한 지역의 풍속특성을 파악하기 위하여 사용되는 풍속 확률밀도 함수로는 Weivull 함수와 Rayleigh 함수가 사용된다. 식 (9)와 같은 레일레이(Rayleigh) 함수는 그 지역의 평균 풍속만으로 풍속의 분포를 알 수 있으므로 본 논문에서 사용하였다 [5].

$$F(v) = \frac{\pi v}{2v_a^2} \exp\left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{v}{v_a}\right)^2\right] \quad (9)$$

여기서 v : 특정풍속[m/s]

v_a : 연평균 풍속[m/s]

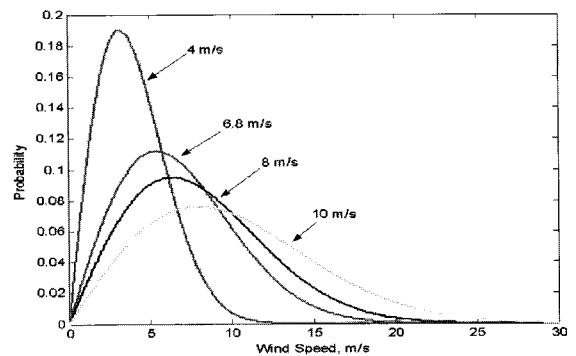


그림 4 풍속의 분포
Fig. 4 Distribution of wind speed

그림 4는 레일레이 분포를 사용하여 연 평균풍속 4.0, 6.8, 8.0, 10.0[m/s]일 때의 각 풍속의 확률 분포를 나타낸 것이다. 본 논문에서는 발전기가 설치되는 지역의 평균 풍속을 대관령 풍력실증단지 지역의 연 평균풍속인 6.8[m/s]이라고 가정하였다.

3.3 풍력 발전시스템의 연간 에너지 생산량

풍력 발전시스템의 연간 에너지 생산량(AEP)은 각 풍속에 대해 1년 동안 부는 시간과 그 풍속에서의 발전기 출력 P_o 를 이용하여 계산한다 [5]. 우선 특정 풍속 v 가 1년 동안 부는 시간 $H(v)$ 는 풍속 v 일 때의 확률을 이용하여 구할 수 있다.

$$H(v) = 365 \times 12 (= 8760 \text{시간}) \times \text{풍속 } v \text{ 일 때 확률} \quad (10)$$

$$= 8760 \times F(v) \Delta v \text{ [hour]}$$

여기서 $H(v)$: 특정 풍속 v 가 1년간 부는 시간, $F(v)$: 특정 풍속 v 의 확률밀도 함수, Δv : 풍속 한 구간의 크기

그리고 풍속 v 일 때 연간 에너지 생산량은 다음과 같게 된다.

$$aep(v) = P_o(v) \times H(v) \text{ [Wh]} \quad (11)$$

여기서 $P_o(v)$: 특정 풍속 v 에서의 발전기의 출력

그러므로 전 풍속 영역에 의한 전체 연간 에너지 생산량은 각 풍속에서 에너지 생산량을 합치면 된다.

$$AEP_{total} = \sum_v aep(v) \quad (12)$$

본 연구에서는 이러한 연간 에너지 생산량(AEPtotal)을 풍력발전기 최적설계의 목적함수로 선정하였다. 풍속 구간을 많이 나누게 되는 경우 즉, Δv 가 작을수록 AEP의 계산은 정확하게 되나 최적화시에 계산시간이 증가하기 때문에 절충해서 선정할 필요가 있다. 본 논문에서는 2.5[m/sec]로 선정하였다.

3.4 풍력 발전기 최적설계

본 논문에서는 표 1에 그 사양이 나타나있는 500kW급 풍력발전 시스템에 사용될 SPMSG의 최적설계를 수행하였다. SPMSG 발전기의 사양은 정격출력 500 [kW]이고, 100극이며, 300 슬롯으로 구성되고, 정격토크는 148 [kNm]이다. 그림 5는 정격 상태에서의 기존 모델의 자속 분포를 나타낸 것이고 최적설계를 통해 AEP최대화모델로 개선시켜 나갈 것이다. 설계 변수는 그림 5에서 볼 수 있듯이 자극각도 (x_1), 고정자 치 폭(x_2), 회전자 요크 두께(x_3), 고정자 슬롯 높이(x_4)를 선정하였다. 발전기의 설치 공간 및 재료비의 제약을 고려하여 고정자 외경 및 축방향 길이는 고정하였고, 극수 및 공극의 길이도 고정하였다. 최적화 수행 시 목적함

수는 앞서 언급한 연간 에너지 생산량(AEP)을 선정하였고 기존 모델과 동일한 출력을 위하여 정격 토크를 제한조건으로 사용하였다.

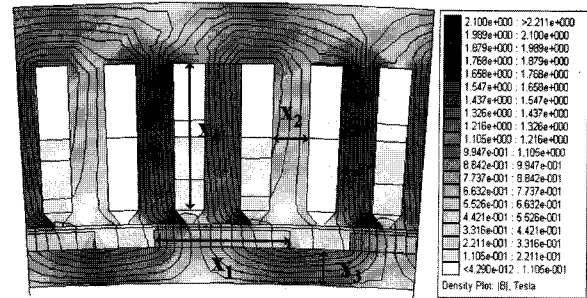


그림 5 표면부착형 영구자석 동기기 설계변수

(x_1 : 자극각도, x_2 : 고정자 치 폭, x_3 : 회전자 요크 두께, x_4 : 고정자 슬롯 높이)

Fig. 5 Design variables of SPMSG(x_1 : the pole-arc angle of PM, x_2 : tooth width, x_3 : stator yoke depth, x_4 : slot depth)

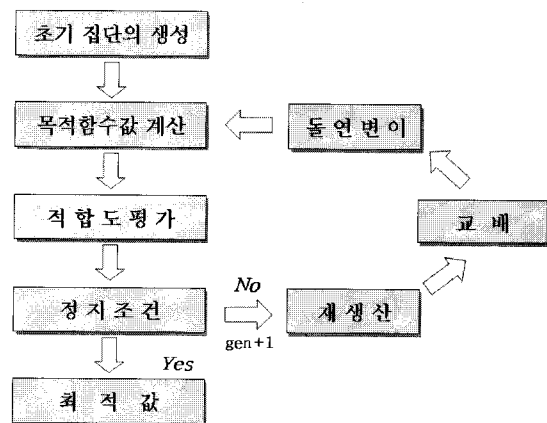


그림 6 유전알고리즘의 구조

Fig. 6 Structure of Genetic Algorithm

본 논문에서 사용한 최적화 기법은 유전 알고리즘 (Parallel Genetic Algorithms)이며, 전 세대수는 200세대이고, 집단의 개체수는 60개이다. 그림 6은 유전알고리즘의 기본 구조로서 초기 설계변수 생성부분인 집단의 초기화, 목적함수값의 계산, 적합도 평가, 수렴 여부 확인 등의 과정을 거쳐 최적의 목적함수 값을 가지는 설계변수 값에 수렴하게 된다.

목적함수로 연간 에너지 생산량을 사용하는 경우에 대해 그림 6의 '목적함수값 계산' 부분을 그림 7에 자세히 나타내었다. 그림 7에 나타내었듯이 유전 알고리즘에서 개체 즉 풍력발전기의 설계변수가 결정되면 식 (8)에 의하여 각 풍속에 따른 주속비와 출력계수를 산정하여 출력전류를 계산한다. 이 출력전류를 이용하여 유한요소해석을 통해 발전기의 손실을 계산하고 이로부터 발전기의 출력을 계산하였다. 그리고 특정 풍속에서의 발전기의 출력과 풍속 확률 분포를 이용하여 연간 에너지 생산량을 계산하게 된다.

그러나 연간에너지 생산량을 계산하기 위해서는 전체 운전 풍속 영역에서 출력을 계산하여야 하므로 계산시간이 매우 증가하게 된다. 본 논문에서처럼 풍속 전체 구간을 10개로 나누는 경우 목적함수 계산시간은 정격효율을 목적함수로 선정할 경우보다 10배로 증가하게 된다. 따라서 과도한 계산시간으로 인해 AEP를 목적함수로 하여 최적설계를 수행하는 것이 현실적으로 불가능하다.

한편 유전 알고리즘의 경우 한 세대마다 개체 집단내의 개체 수만큼 목적함수를 반복 계산하는데 개체 집단의 개체 수가 60개인 경우 한 세대당 60번의 목적함수 계산이 필요하게 된다. 그러나 개체 집단 내에서 목적함수를 계산하는 것은 서로 독립적이므로 병렬화 하는 것이 가능하다. 메인 컴퓨터와 인터넷으로 연결된 서버 컴퓨터의 수만큼 개체 집단을 분할하여 목적함수를 계산을 병렬적으로 수행하므로 서버 컴퓨터의 수에 비례하여 전체 목적함수 계산시간이 줄어들게 된다. 메인 컴퓨터에서는 목적함수 계산을 제외한 유전 알고리즘이 수행되고 가장 시간이 많이 소요되는 목적함수의 계산은 서버 컴퓨터에서만 수행하는 것이다. 메인 컴퓨터와 서버 컴퓨터와의 데이터 교환은 internet web 서비스를 통해서 구현하였다. 이러한 인터넷 분산 컴퓨팅을 활용하여 목적함수 계산을 병렬화 함으로써 유한요소해석법을 사용하는 풍력발전기의 최적설계시에 발생하는 과도한 계산시간 문제를 해결하였다. 참고로 본 논문에서는 10대의 서버 컴퓨터를 메인 컴퓨터와 연결하여 계산시간을 단축하였다.

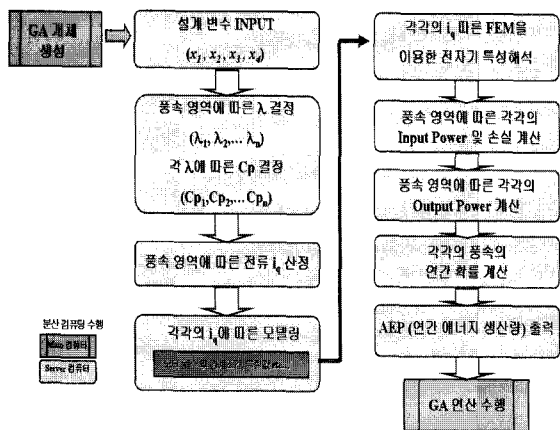


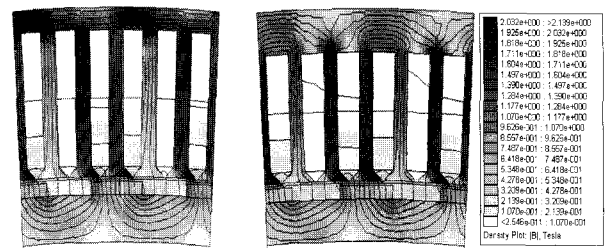
그림 7 연간에너지 생산량(AEP) 계산 흐름도
Fig. 7 Flowchart of the AEP calculation

3.5 SPMGS의 최적 설계 결과

발전기의 정확한 특성해석과 최적설계를 수행하기 위하여 유한요소법과 유전알고리즘을 결합하고, 병렬 분산 컴퓨팅을 통한 연간 최대 에너지 생산량을 목표로 하는 표면부착형 영구자석 동기발전기의 최적설계 결과를 표 2에 나타내었다. 참고로 기존모델과의 비교검토용으로 목적함수를 AEP모델 외에 일반적인 설계에 주로 적용되는 정격효율 최대화 설계를 별도로 수행하여 제시하였다. AEP 최대설계 모델은 연간 에너지 생산량(1234.5MWh)면에서 기존모델대비 3.4%, 정격효율 최대화 모델에 비해서는 1.3% 개선효과를 나타내었다.

표 2 최적화 모델의 결과 비교(정격풍속=13.5(m/s))
Table 2 Comparison Results of optimally designed One

목적함수	설계 변수				AEP [MWh]	정격효율 [%]
	자극각도 (X_1)	치 폭 (X_2)	회전자 요크 (X_3)	슬롯 높이 (X_4)		
기존 모델	2.500	12.5	13.0	58.0	1193.4	91.6
정격효율 최대화	1.948	10.5	22.3	69.2	1218.3	95.0
AEP 최대화	1.892	8.8	19.6	59.6	1234.5	94.9



(a) 효율 최대화 모델 (b) AEP 최대화 모델

그림 8 최적화 설계된 표면부착형 영구자석 동기발전기의 정격(509.32kW, 13.5(m/s))조건에서의 자속분포비교
(a) Max. efficiency model (b) Max. AEP model

Fig. 8 Comparison results of the flux density distribution of the optimally designed SPMSG at the rated condition (509.32kW at 13.5(m/s))

그림 8은 최적화 설계된 SPMSG의 효율 최대화 모델과, AEP최대화 모델의 정격속도에서의 자속 밀도 분포이며 표 2와 같이 정격효율 최대화 모델 대비 AEP최대화 모델은 고정자 요크 폭 증대, 자극각도 감소, 치 폭 감소, 회전자 요크 감소, 슬롯높이 감소의 영향으로 자속분포의 조밀성에 차이를 보인다. 특히 AEP 최대화 모델의 고정자 슬롯의 깊이가 최적설계 수행 결과로 감소하고 고정자 요크두께는 효율최대화 모델 대비 16% 크게 설계되었다. 결과로 정격 효율 최대화 모델은 고정자 요크에서 AEP최대화 모델은 슬롯사이의 치부분에서 자속밀도 포화가 현저하게 나타났다. 그림 9와 10은 기존 모델과 최대화 모델들의 풍속에 따른 손실을 비교한 그림이다. 그림 9와 10에서 알 수 있듯이 AEP 최대화 모델은 고정자 요크 두께가 증가하였지만 요크 자속밀도가 감소하여 철손이 다른 모델 보다 현저히 작았고, 슬롯면적의 감소로 효율 최대화 모델에 비해 동손은 약간 증가하였다. 이로 인해 AEP 최대화 모델의 연간 에너지 생산량이 다른 모델에 비해 높아진 것이다.

AEP최대화 된 모델과 정격에서의 효율 최대를 한 모델을 풍속 대비 출력, 에너지, 효율 특성 비교결과를 그림 11, 12, 13에 각각 나타내었다. 그림 11에서는 발전출력은 정격속도(13.5(m/s))까지 풍속에 비례 하여 509.32[kW]까지 증가하였고 정격 풍속 이상에서는 피치 제어에 의해서 출력이 일정해짐을 알 수 있다. 반면에 에너지 생산량은 그림 12에

서와 같이 풍속 11[m/s]에서 최고값(407.87[MWh])을 가졌다. 에너지 생산량은 풍속이 정격속도 이하인 영역에서 최대가 됨을 알 수 있다. 그림 11과 12에서 알 수 있듯이 AEP 최대화 모델은 대체로 전 풍속 영역에서 기존 모델과 효율 최대화 모델에 비해 출력과 에너지생산량의 개선 효과가 두드러진다.

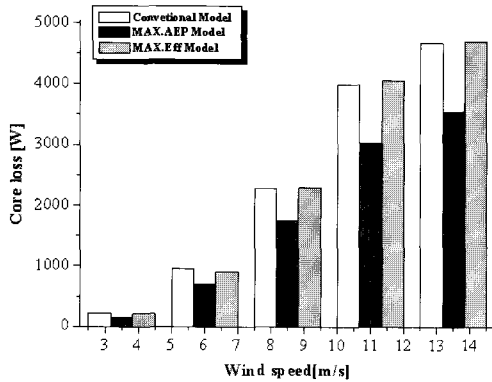


그림 9 풍속별 철손 비교결과
Fig. 9 Comparison results of core loss versus wind speed

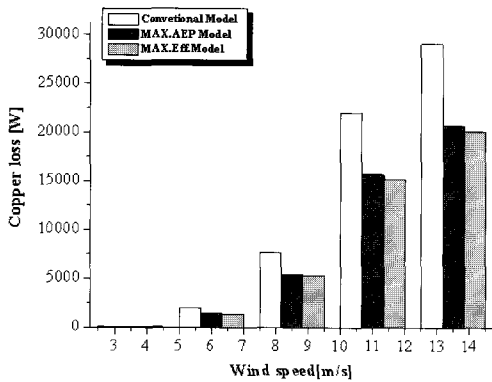


그림 10 풍속별 동손 비교결과
Fig. 10 Comparison results of copper loss versus wind speed

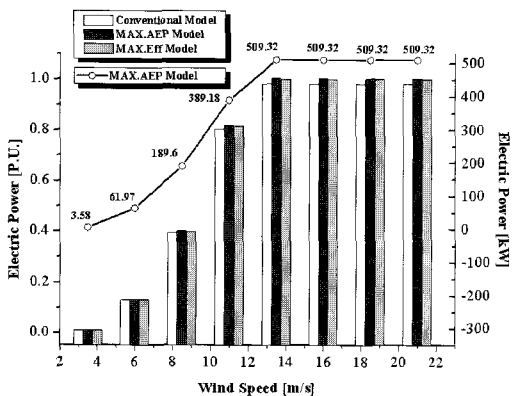


그림 11 풍속별 출력 비교결과
Fig. 11 Comparison results of electric power generation versus wind speed

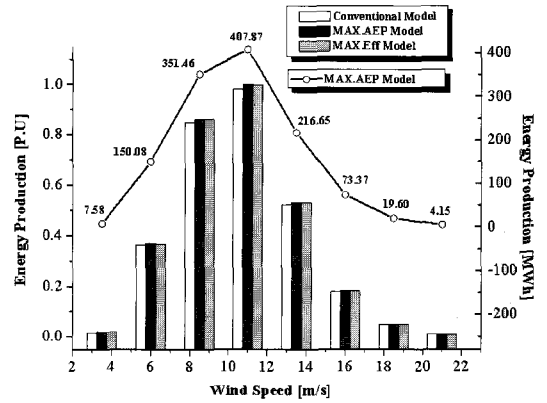


그림 12 풍속별 에너지양 비교결과
Fig. 12 Comparison results of energy production versus wind speed

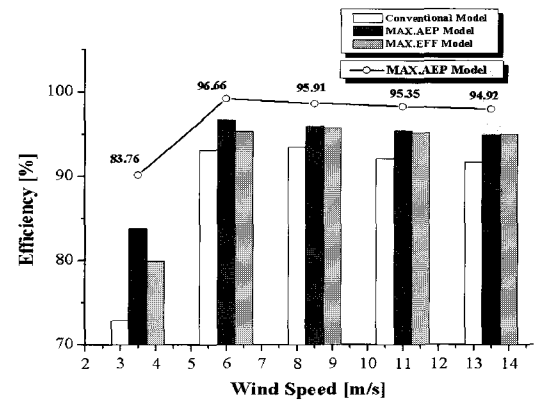


그림 13 풍속별 효율 비교 결과
Fig. 13 Comparison results of efficiency versus wind speed

그림 13에서는 각 설계모델의 풍속에 따른 효율특성을 비교 하였는데 특히 AEP 최대화 모델은 사용빈도가 높은 평균 풍속근처(6[m/s])에서 효율이 최대(96.66%)가 되었다. 정격풍속(13.5[m/s])에서만 효율 최대화 모델이 AEP 최대화 모델에 비해 효율이 조금 앞섰지만 (표 2에서 나타내었듯이 정격효율은 AEP최대화 모델이 94.9[%], 정격효율최대화 모델이 95[%]), 대체적으로 전 운전영역에서 AEP최대화 모델의 효율이 다른 모델들과 대비 개선되었다. 따라서 최적화 설계된 AEP최대화 모델이 기존모델과 효율최대화 모델보다 속도별 출력, 에너지, 효율측면에서 우수함을 확인할 수 있다. 특히 풍력 발전기의 궁극적인 목적이 연간 에너지의 총생산량 최대화이므로 본 논문에서 제안된 설계 목표 및 최적설계 결과는 큰 의미를 가진다고 생각된다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법과 유전알고리즘을 결합하여 영구자석형 풍력발전기의 최적설계를 구현하였으며, 유한요소 해석이 사용되는 최적설계의 문제점인 최적화 수행시간을 단축하기 위해 인터넷 분산컴퓨팅을 최적설계와 결합하였다. 또한, 목적함수로 정격 풍속에서만 특성을 사용하지 않고

연평균풍속과 풍속 확률분포를 바탕으로 연간 에너지 총생산량을 사용하였다. 이러한 방법을 통해 AEP 최대화 최적 설계 모델은 초기 모델 대비 약 3.4[%], 정격효율 최대화 모델 대비 1.3[%]의 연간에너지 생산량을 증가시켰다.

감사의 글

이 논문은 2004학년도 동의대학교 교내연구비에 의해 연구되었음(과제번호2004AA144)

참 고 문 헌

[1] J. F. Manwell, J. G. McGowan and A. L. Rogers, "Wind Energy Theory, Design and Application," John Wiley & Sons, 1st Ed., 2002.

[2] Y. Chen, P. Pillay and M. A. Khan, "PM wind generator comparison of different topologies," Proc. of 39th IAS Annual Meeting Conference, Vol. 3, No. 3-7, pp 1405-1412, October.2004.

[3] M. A. Khan, P. Pillay and M. Malengret, "Impact of direct-drive WEC Systems on the design of a small PM wind generator," Proc of IEEE Power Tech Conference, Vol. 2, pp. 23-26, June 2003.

[4] W. Wu, V. S. Ramsden and T. Crawford, "A Low-speed, High-torque, Direct-drive Permanent Magnet Generator for Wind Turbines," Conference Record of Industry Applications, Vol. 1, pp. 147-154, Oct., 2000.

[5] Donald S.Zinger et al, "Annualized Wind Energy Improvement Using Variable Speeds," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 33, pp. 1444~1447, November, 1997.

[6] Anders Grauers, "Design of Direct-driven Permanent-magnet Generators for Wind Turbines," Ph.D Thesis Chalmers University, October 1996.

[7] Inoue, A., Hasan Ali Mohd., Takahashi, R., Murata, T., Tamura, J., Ichinose and M., Kazumasa Ide, "A Calculation Method of the Total Efficiency of Wind Generator," Proc. of PEDS2005, Vol. 2, No. 28-01, pp. 1595-1600, Nov. 2005.

[8] D.E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning," Addison-Wesley Publishing Co. Inc., N.Y., 1989.

[9] A. Esposito and L. Tarricone, "Grid computing for electromagnetics: a beginner's guide with applications," IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol.45, No.2, pp. 92-99, April 2003.

[10] M. Milenkovic et al., "Toward Internet distributed computing," Computer, pp.38-46, May 2003.

[11] H.S. Choi et al., "A Distributed Computing Technique for Analysis of Electric Machines Using Internet Web Services," Digest of CEFC2004, pp.124, June6-9, 2004.

[12] 조명수 외 3인, "병렬 컴퓨팅을 이용한 영구자석 직류 전동기의 최적설계", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 649-650, 2006.

[13] 유능수, 경남호, "750kW급 풍력발전기 실증연구", 강원대학교 연구보고서, 2004.

[14] 원종수 譯, "대학과정 전기설계학", pp.18~24, 1994.

저 자 소 개



정 호 장 (鄭昊彰)

1980년 8월 15일생. 2007년 동아대 전자공학과 졸업. 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정
E-mail : bawoo8015@hotmail.com



정 상 용 (鄭相龍)

1973년 9월 20일생. 1997년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(공학석사). 2003년 동 대학원 졸업(공학박사). 2003~2006년 현대자동차 연구개발본부 선임연구원. 현재 동아대학교 전기공학과 조교수.
E-mail : syjung@dau.ac.kr



한 성 진 (韓聲鎭)

1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년 3월 ~ 현재 동아대 전기공학과 교수.
E-mail : schahn@dau.ac.kr



이 철 군 (李哲均)

1967년 1월 28일생. 1989년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1999년 현대중공업 중앙연구소 선임연구원. 2002년 미국 Univ. of Wisconsin 방문연구교수. 1999~현재 동의대학교 전기공학과 부교수.
Tel : (051) 890-1672
Fax : (051) 890-1664
E-mail : cglee@deu.ac.kr