

# 소형풍력발전기의 전자기 설계구조에 따른 출력특성 비교

정태욱 (경남대학교 교수/공학박사) · 김주용 (경남대학교 시간강사/공학박사)

## 1 서론

### 1.1 소형 풍력 발전의 필요성

에너지 수요의 증가로 인한 자원의 고갈과, 온실가스 배출량의 증가로 인한 지구 온난화 현상의 문제로 인하여 현재 대체에너지의 개발이 시급하며, 여러 종류의 신재생 에너지원 중에서도 경제성, 환경적 측면과 효율적 측면, 우리나라의 지형적 측면을 고려할 때 풍력발전의 활용성이 높다.

풍력발전은 어느 곳이나 산재되어 있는 무공해, 무한정의 바람을 이용하므로 환경에 미치는 영향은 거의 없고, 국토를 효율적으로 이용할 수 있으며, 대규모 발전 단지의 경우에는 발전 단가도 기존의 발전 방식과 경쟁 가능한 수준의 신에너지 발전 기술이다.

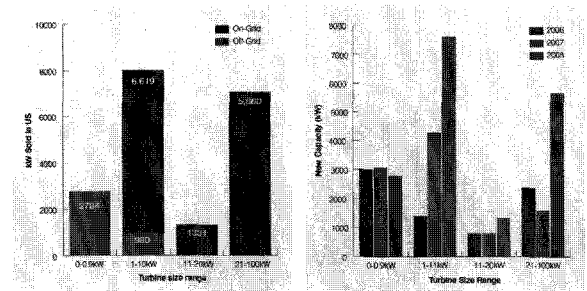
표 1은 주요기술별 발전단가(2006년 기준)를 보여주며, 풍력발전은 석탄화력 발전보다도 단가가 낮아 매우 경제적이며 효율적인 신재생 에너지원임을 보여준다. 기존의 풍력발전기는 주로 해상이나 강원도와 제주도를 중심으로 바람이 강한 곳에 폭이 수십 미터에 달하는 MW급 대형기 위주의 운용 및 개발이 이루어져 왔다. 하지만 설치비 및 유지관리비가 많이 들고 시공기간 및 보수시간이 길어 운용에 어려움이

있다. 미국과 영국을 중심으로 세계 주요국들은 에너지소비 및 이산화탄소 배출이 집중되어있는 대도시에 경제성, 효율성 및 환경적 측면을 고려한 도심 옥상의 소형 풍력발전 시스템의 설치를 확대하고 있다. 그림 1은 용량별 풍력발전기 성장률을 보여주고 있다.

표 1. 에너지원별 발전원가 비교

기존 및 화석에너지		신·재생에너지	
기술	단가	기술	단가
원자력	38	풍력(육상)	54
석탄화력	60	지열	53
가스화복합발전	50	바이오매스	71
가스화단일발전	76	태양광	265

※ 출처 : HSBC, "Power for a new generation", 2007. 3



※ 출처 : "2009 AEW Small Wind Turbine Global Market Study"

그림 1. 미국 용량별 풍력발전기 성장률

이러한 소형 풍력발전기는 태양광 발전과 같은 다른 신재생원과 더불어 최근 이슈화되고 있는 그림 2와 같은 분산형 smart grid(micro grid) 전력시스템으로 구성될 수 있다[1]. 이 경우 신재생 에너지의 활용과 더불어 전력수용가의 근거리에 전력발생장치가 위치하고 있어 원거리 전력송전 때 발생하는 손실을 33(%) 정도 줄일 수 있는 매우 효율적인 전력공급체계를 갖출 수 있다고 독일의 RWE는 추정하고 있다. 이처럼 소형 풍력발전기에 대한 선진국의 관심이 높아지고 있지만, 우리나라에서는 대형기 위주의 투자개발이 편중되어 소형 풍력발전기 부분의 기술력 및 세계화에 뒤처질 수 있다. 따라서 저탄소 녹색성장의 핵심기술이 될 수 있는 소형풍력발전기에 대한 연구개발이 시급하다.

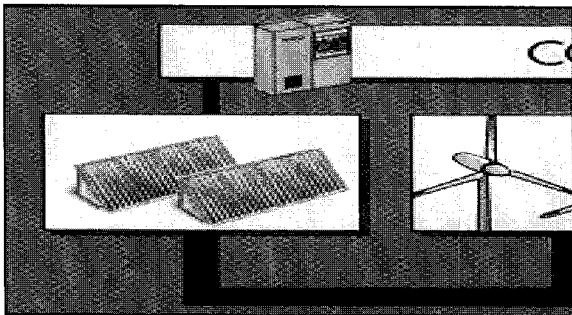


그림 2. 풍력 및 신재생 에너지를 활용한 Smart Grid System

## 2. 국내·외 관련 기술의 현황

### 2.1 국내 기술현황

국내의 경우 풍력발전기에 대한 기술개발의 관심이 주로 대기업을 중심으로 초대형 MW급의 풍력발전기에 집중되어 있으며, 상대적으로 소형 도심형 풍력발전기에 대한 관심은 떨어진다. 국내에서는 대략 5개의 중소기업이 소형 도심형 풍력발전기의 성능 개선에 대한 개발을 진행 중이며, 기술개발의 근간은 저풍

속에 적용 가능한 블레이드 시스템 구조 설계와 저속용 발전기 개발에 집중하고 있다.

보성파워텍은 한국전력과 협력하여 국내 최초로 그림 3과 같은 자이로밀형 수직축 풍력발전기를 개발했다. 자이로밀형 수직축 발전기는 저풍속에서 발전이 가능하며, 회전속도가 낮아 기존의 수평축 발전기와 비교하여 상대적으로 소음이 낮다고 한다.

아이알윈드파워(주)에서는 수평축에 비해 발전효율이 떨어지는 것으로 평가받았던 수직축 풍력발전기 분야에서 기존의 수평축 보다 효율이 좋은 1(kW)급과 5(kW)급의 그림 4와 같이 수직축 터보풍력발전기를 개발하여 상용화된 제품을 내놓았다. 이 기술은 독자적인 새로운 블레이드 구조의 설계로 인해 3(m/s)의 저풍속에서 발전이 가능하다고 한다.

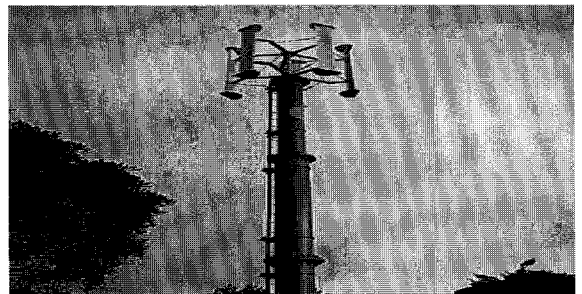


그림 3. 자이로밀형 수직축 풍력발전기(보성파워텍)



그림 4. 5(kw)급 터보풍력발전기(아이알윈드파워)

아하에너지는 그림 5와 같은 상호 역방향 블레이드를 적용한 수평축 풍력발생기를 개발 완료하고,

1[kW]~2[MW]급 제품 생산을 목표로 실증 중에 있으며, 기존 단방향보다 에너지발생 효율이 높고, 풍향의 영향을 작게 받으며, 수직축 풍력발전기와 비슷한 4(m/s)정도의 바람에서도 발전 가능하다고 한다. 하지만, 이 경우 수평형 블레이드이기 때문에 전, 후 2개의 블레이드를 통과하는 공기의 와류 등의 문제가 생길 수 있다. 또한 상호회전자형의 모터의 구조가 일반적인 기존 발전기이기 때문에 저속에서의 발전효율이 낮다는 한계를 가진다.

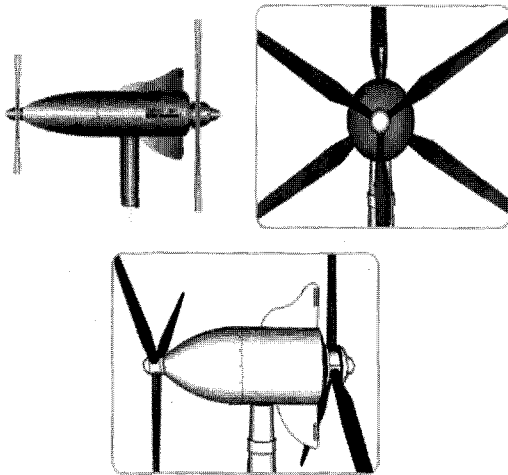


그림 5. 상호 역방향 수평축 풍력발전기 외형

서영테크에서는 저속 회전에서 상대적으로 높은 효율 및 출력전압을 갖는 600[W]~5[kW]급 AFPM 발전기를 생산하고 있다. 이 발전기는 외률휘(outer rotor)구조이며 자기에너지밀도가 높은 희토류 영구자석을 채용하였으며 coreless구조의 고정자 철심 및 권선구조로 되어 있다. 이 타입의 AFPM 발전기에서는 고정자 권선이 coreless구조이므로 공극에서의 자기저항이 크기 때문에 영구자석의 자속의 효율적 활용성이 떨어지고, 고정자 권선의 몰딩 공정이 어려우며 방열 구조가 좋지 않아 권선에서 발생된 열로 인하여 손실이 발생하게 된다.

## 2.2 국외 기술현황

최근 외국에서는 가정, 사무실, 빌딩 등에 활용될 도심형 소형 풍력발전기에 대한 기술개발이 활발히 이루어지고 있으며 주로 영국, 독일, 미국 등의 풍력발전기 업체들이 이를 주도하고 있으며, 일본 또한 상당한 기술력을 지닌 것으로 조사된다.

특히 영국의 QR사는 최근 수직형 풍력발전기의 성능과 외형적 예술성을 겸비한 그림 6과 같은 블레이드를 개발하여 다양한 용도의 소형 풍력발전기를 개발 설치하고 있다. 이들은 기존에 개발된 소형 발전기를 사용하고 있으며, 예술성과 성능을 겸비한 블레이드 시스템의 설계 응용기술이 주를 이루고 있는 것으로 조사된다. 현재 QR사의 도심형 풍력발전기는 런던과 뉴욕의 초고층 빌딩에 적용될 계획이며, 향후 QR사에서 제조된 소형풍차가 유럽과 미국의 지붕을 장식할 것으로 예상된다. 독일의 에너지 회사인 RWE 또한 가정이나 사무실과 빌딩의 지붕에 설치가능한 수직형 도심형 하이테크 풍력터빈을 개발하고 있으며, 이를 유럽과 미국에 판매설치 할 사업계획을 가지고 있다. 이 풍력터빈은 소음이 거의 없고 날개크지 않으며 바람이 어느 방향으로 불어도 회전이 가능하며, 연간 10(MWh)의 전기를 생산할 수 있다

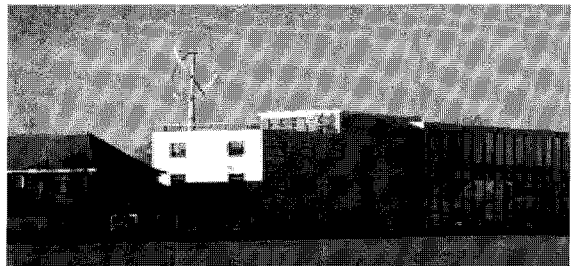


그림 6. 영국 QR사의 독창적인 수직형 블레이드 구조의 도심형 풍력발전기

미국의 Urban Green Energy에서는 그림 7과 같은 수직형의 3[kW]급 풍력발전기를 개발하여 생산하고

있으며, 최저풍속은 4[m/s]이며 기술적 초점은 저소음화에 기반을 두고 있다. 국내업체 중의 하나인 보성 파워텍의 자이로밀형 수직축 풍력발전기와 유사하다.

이러한 내용들을 종합하면 국외 기업의 도심형 풍력발전기의 최대 기술적 관심사 또한 저풍속에서의 발전능력 확보와 고효율화, 소음의 최소화에 집중되어 있다.

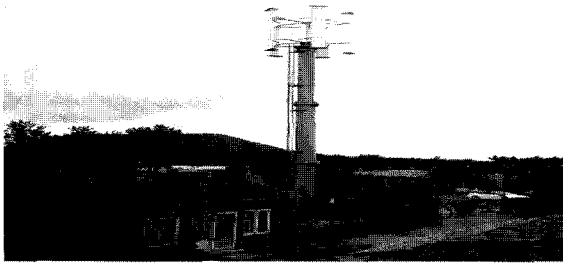


그림 7. 미국 Urban Green Energy사의 3[kW] 수직축 풍력 발전기

### 3. 전자기구조에 따른 소형풍력발전기의 출력 특성 비교

#### 3.1 전자기구조별 발전기 모델

본 절에서는 전자기 구조에 따른 소형풍력발전기의 출력 특성 비교를 위해 서로 다른 구조의 200마력 1200[rpm] 원통형(radial flux)발전기와 수직형(axial flux)발전기 6대를 모델링 및 비교하였다(2). 두 가지 형태의 원통형발전기는 고정자 슬롯(slot)의 유무와 회전자 영구자석의 형태에 따라서 non-slotted radial flux surface mounted (RFSM-NS)와 slotted radial flux surface mounted(RFSM-S)발전기라고 한다. 또한 수직형발전기는 고정자 슬롯의 유무와 회전자의 위치에 따라서 TORUS형 발전기와 KAMAN형 발전기라 한다. 그림 8에 소형 풍력 발전기의 구조 및 형상을 나타내었다(3-8).



그림 8. 구조별 발전기 형상비교

실험기 모델링 및 해석을 위해서 유한요소 해석법을 이용하였으며, 모든 출력특성 또한 유한요소 해석법을 이용하여 계산하였다. 구조적인 특징으로 인해서 TORUS형 발전기와 KAMAN형 발전기의 모델링 및 해석을 위해서는 3D 유한요소 해석법을 이용하였다(9-10).

#### 3.2 Non-Slotted 발전기의 토크리플 비교

전기자 전류가 정현파일 때, 토크의 리플성분은 역기전력의 고조파 성분에 비례 의해 발생하기 때문에 영구자석의 형상최적화와 회전자에 경사를 주어서 최소화할 수 있다. 이 이론은 TORUS-NS 발전기에서 적용될 수 있다. 그림 9는 영구자석의 극호비와 회전자 경사각 사이의 torquer ripple factor(TRF)관계를

나타내었다. 그림 9에서 보는 것과 같이 극호비가 0.81이고 경사각이 전기각 32.4[°]일 때 TRF는 최소가 된다. 영구자석의 극호비와 회전자 경사각에 따른 단위 토크의 관계를 그림 10에 나타내었으며 극호비가 약 0.81일 때 단위토크가 최고가 됨을 알 수 있다.

또한 그림 11에 영구자석의 극호비와 회전자의 경사각에 따른 6고조파성분과 12고조파성분의 관계를 나타 내었다. 그림 11에서 보면 알 수 있듯이 극호비가 거의 0.8이고 경사각이 30[°]일 때 고조파 토크리플이 최소가 된다.

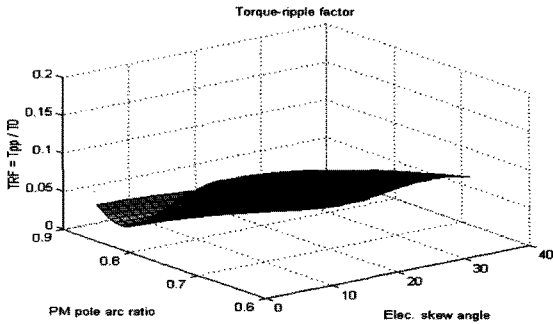


그림 9. 극호비  $\alpha_i$ 와 회전자 경사각  $\theta_{skew}$  사이의 TRF 관계

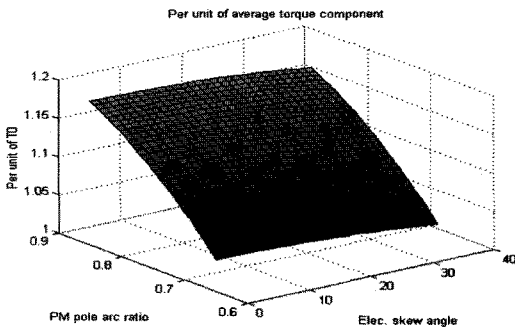
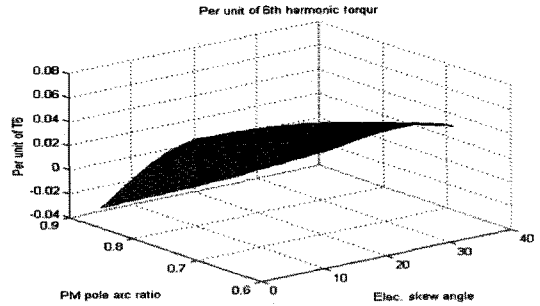


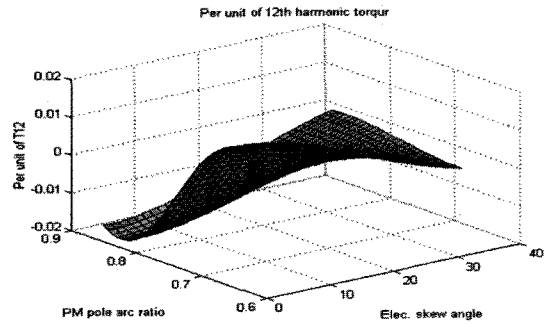
그림 10. 극호비  $\alpha_i$ 와 회전자 경사각  $\theta_{skew}$ 에 따른 토크 관계

### 3.3 코킹(cogging)토크 비교

2D, 3D 유한요소 해석을 통해서 각각의 발전기 코



(a) 6고조파



(b) 12고조파

그림 11. 극호비  $\alpha_i$ 와 회전자 경사각  $\theta_{skew}$ 에 따른 고조파 성분 관계

킹토크를 계산할 수 있다. 무부하와 부하실험을 통해서 코킹토크와 토크리플을 그림 12에 나타내었다.

RFSM-S발전기는 켜기모양의 슬롯을 사용하였음에도 불구하고 코킹토크가 가장 높았다. 그리고 이 실험으로부터, 켜기모양의 슬롯을 사용하지 않은 원통형 발전기와 슬롯이 있는 수직형 발전기를 비교했을 때, 슬롯이 있는 수직형 발전기의 코킹 토크가 훨씬 적음을 알 수 있다. 슬롯이 없는 발전기 중에 RFSM-NS 발전기의 코킹토크가 가장 높게 나타났다. 그리고 슬롯이 있는 발전기와 슬롯이 없는 발전기 모두 비교했을 때 슬롯이 없는 발전기의 코킹토크가 더 낮음을 알 수 있다.

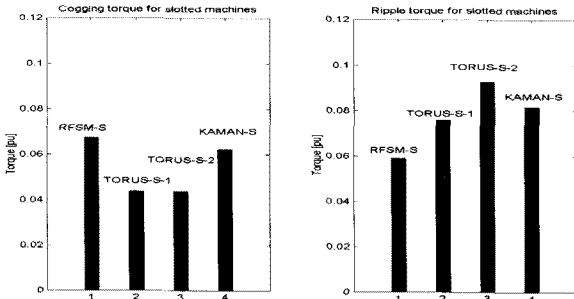


그림 12. 슬롯이 있는 발전기의 코킹토크와 토크리플의 비교

#### 4. 성능 비교

본 절에서는 지금까지 설명한 각 발전기의 출력특성 및 주요인자 그리고 발전기별 소음 및 진동과 열에 관련된 특성을 비교 설명한다. 그림 13은 출력 밀도를 비교 한 것으로 RFSM형에서는 슬롯이 있는 발전기가 토크밀도가 높으며, AFPM형에서는 슬롯이 없는 발전기에서 토크밀도가 높다. 이는 발전기의 전체적인 부피와 중량에 비례해서 도출한 결과 값이며, 일반적으로 슬롯이 있는 발전기가 토크밀도가 높게 나타났다.

그림 14는 효율을 비교한 것으로 KAMAN-S는 회전자 주위에 고정자 및 슬롯을 설치하게 되므로 고정자에서 철손이 발생하며 슬롯에 설치된 권선에서 동손 발생하게 되므로 KAMAN-S발전기에서 효율이 가장 낮게 나타난다.

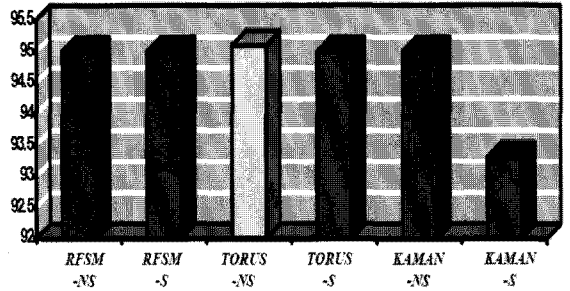


그림 14. 효율 비교(%)

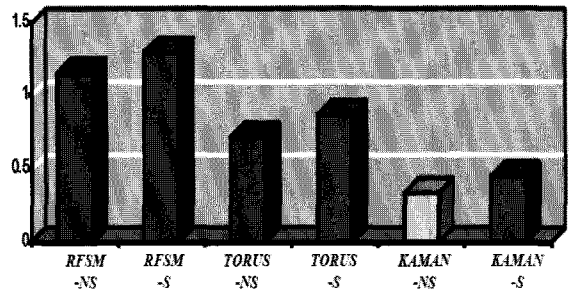


그림 15. 발열특성 비교(W/cm²)

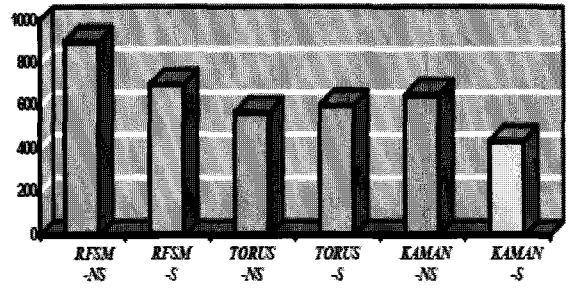


그림 16. 발전기 중량 비교 (lb)

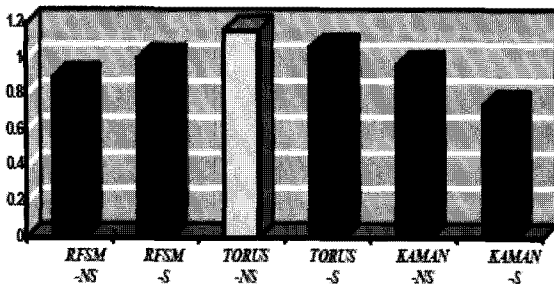


그림 13. 출력밀도 비교(ratio)

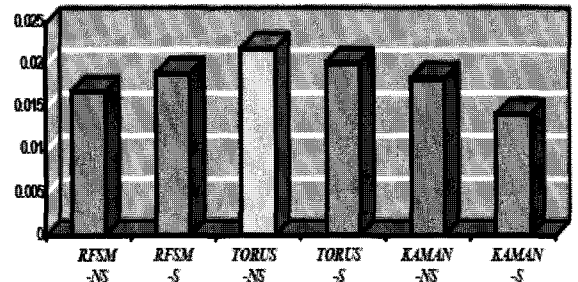


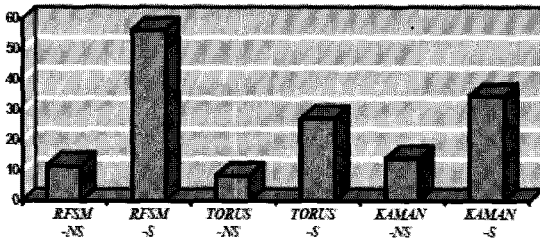
그림 17. 토크밀도 비교(Nm/cm³)

그림 15는 발열 특성을 비교한 것으로 RFSM발전기는 부피가 크기 때문에 발열이 가장 높게 나타난다. 또한 TORUS발전기의 고정자는 회전자 사이에 설치하며 KAMAN발전기의 고정자는 외부에 설치하게 되므로 고정자가 외부에 설치된 KAMAN발전기가 더욱더 발열상태가 우수하다. 발전기 중량은 그림 16에 나타낸 것처럼 KAMAN발전기의 중량이 가장 낮은 편이며 그중에서 KAMAN-S발전기의 중량이 더욱더 낮다. 그림 17은 토크 밀도를 비교한 것이며 이 또한 KAMAN-S발전기가 가장 낮다.

그림 14로부터 그림 17까지의 특성을 살펴보면 슬롯이 없는 수직축 발전기가 슬롯이 있는 수직축 발전기에 비해서 토크밀도, 효율 및 발열 등의 면에서 보다 우수한 것으로 나타났다.

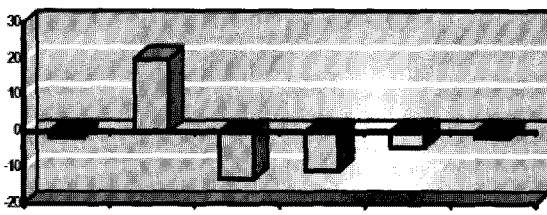
소음 및 진동에 대하여 살펴보면 일반적으로 고주파 영역에서 소음이 발생하고, 저주파 영역에서 진동

No Skewed Rotor PM – Full-load Case:



(a)

Skewed Rotor PM – Full-load Case:



(b)

그림 18. 발생소음 비교(dB)

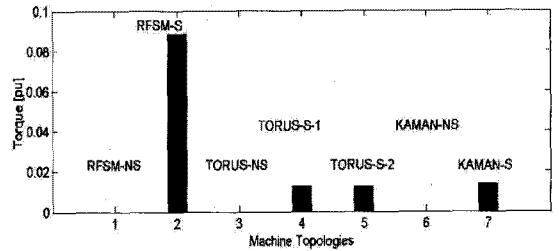
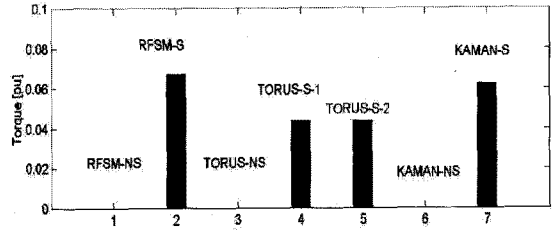


그림 19. 코킹토크 비교(pu)

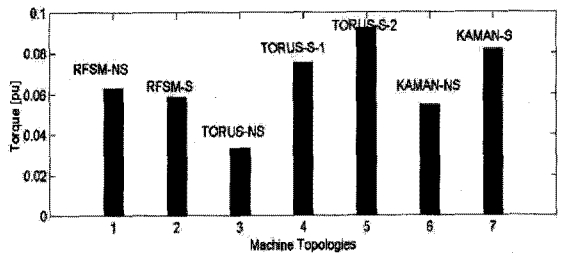
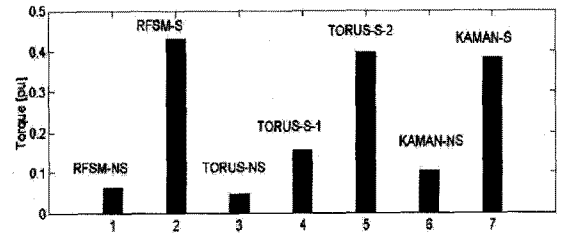


그림 20. 토크리플 비교(pu)

발생한다. 영구자석의 회전자 경사각이 없을 때 TORUS에서 소음이 가장 낮으며, 경사각을 주었을 때에는 TORUS에서 저주파가 발생하게 되어 약간의 진동이 발생하지만 데이터를 종합했을 때 전체적인 진동 및 소음 특성은 TORUS가 가장 우수한 것을 그림 18을 통해서 알 수 있다.

일반적으로 슬롯이 없는 발전기에서는 코킹토크를 무시할 수 있을 정도로 작다. 그림 19와 그림 20은

각각 코킹토크와 토크리플을 비교한 것이다. 그림 19에서 RFMS-S의 코킹토크가 가장 크게 나타났으며, 코킹토크는 최적 극호비와 회전자의 경사각을 주어 줄일 수 있는 것을 알 수 있다.

그림 19에서 보통 회전자에 경사각을 주었을 때, 슬롯이 없는 발전기가 슬롯이 있는 발전기에 비해서 낮은 토크리플을 내는 것을 알 수 있으며, TORUS-NS발전기는 타 구조의 발전기에 비해서 낮은 토크리플을 가진다는 것을 알 수 있다.

## 5. 결 론

풍력발전은 환경오염을 최소화 하면서 에너지 자원을 무한대로 사용할 수 있기 때문에 경제성이 높은 대체에너지원이다. 에너지 소비 및 이산화탄소 배출이 집중되는 대도시에 소형풍력발전 시스템 설치 확대는 대기오존층파괴 측면을 고려해 볼 때 반드시 필요하다. 이러한 소형 풍력 발전시스템은 전자기 구조에 따라 출력 특성이 다양하므로 이를 비교해보면 첫째, TORUS-NS 발전기에서 리플토크 및 코킹토크는 무시할 수 있을 정도로 작게 나타난다. 둘째, TORUS 발전기는 RFMS이나 KAMAN발전기에 비해 높은 출력 및 토크밀도를 낼 수 있다. 마지막으로 TORUS에서 약간의 진동이 발생했지만 진동 및 소음 데이터를 종합했을 때 TORUS가 가장 우수한 것으로 분석된다. 따라서 전체적인 효율 면에서 TORUS 발전기의 성능이 우수하기 때문에 소형풍력발전기의 전자기 모델선정으로 적합한 것을 알 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] Siegfried Heier "Grid Intergration of Wind Energy Conversion System" John Wiley & Sons, 1998.
- [2] T. A. Lipo, S Huang and M. Aydin, "Performance Assessment of Axial Flux Permanent Magnet Motors for Low Noise Applications", Final Report to CNR, Oct 2000.
- [3] P. Campbell, "Principles of a Permanent-Magnet Axial-Field DC Machine", Proc. IEE, Vol. 121, No. 12, pp. 1489-1494,

- Dec. 1974.
- [4] E. Spooner and B. J. Chalmers, "TORUS, A Toroidal -Stator, Permanent Magnet Machine for Small Scale Power Generation", International Conference on Electrical Machines, MIT, Cambridge, pp. 1053-1058, 1990.
- [5] C. C. Jensen, F. Profumo and T. A. Lipo, "A Low Loss Permanent Magnet Brushless DC Motor Utilizing Tape Wound Amorphous Iron", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 28, No. 3, pp. 646-651, May/June 1992.
- [6] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi, and T. A. Lipo, "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines," IEEE Transactions on Industry Applications, IEEE Trans. IA-34, No.1, pp.92-97, 1998.
- [7] K. Sitapati and R. Krishnan, "Performance comparison of radial and axial field permanent magnet brushless machines", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.37, No.5, Sept/Oct 2001, pp. 1219-1226.
- [8] S. Huang, J. Luo, F. Leonardi and T. A. Lipo, "A Comparison of Power Density for Axial Flux Machines Based on the General Purpose Sizing Equation", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol.14, No.2, pp. 185-192, June 1999.
- [9] S. Huang, J. Luo and T. A. Lipo, "Analysis and evaluation of the transverse flux circumferential current machine", Conference Record of the IEEE Industry Applications Society, 32nd IAS Annual Meeting, pp. 378-384, 1997.
- [10] YD Chun, DH Koo, YH Cho, and WY Cho, "Cogging Torque Reduction in a Novel Axial Flux PM Motor" International Symposium on Power Electronics Electrical Drives, Automation and Motion, S7-16-19, 2006.

## ◇ 저 자 소 개 ◇



**정태욱 (鄭泰旭)**

1970년 5월 16일생. 1993년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996~2005년 LG전자(주) 책임연구원. 2006~2007년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2007년~현재 경남대 전기공학과 조교수.



**김주용 (金周容)**

1977년 12월 1일생. 2002년 경남대 전기공학과 졸업. 2004년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 경남대학교 전기공학과 시간강사.