

## 직접구동 영구자석 풍력발전기 기술동향

이정일<sup>\*</sup> 권중록<sup>\*</sup> 김기찬<sup>\*</sup>  
현대중공업(주) 기계전기연구소

### A Technical Trends of Direct-Driven Permanent Magnet Generator for Wind Turbine

Lee Jung-il<sup>\*</sup> Kwon Jung-Lock<sup>\*</sup> Kim Ki-Chan<sup>\*</sup>  
Electro-Mechanical Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., LTD.

**Abstract** - Recently, the generators for wind turbine have been manufactured with high output power such like MW class machine in order to reduce the generation cost and to increase the energy efficiency. At the same time, direct-driven generators for wind turbine have been developed and researched, which have easy maintenance and high efficiency by simplification the system through the removal of the gear box.

In this paper, at first, the advantage and disadvantage between the direct-driven generator system and conventional indirect-driven system are compared. And secondly, the permanent magnet generator (PMG) for wind turbine has been rapidly improved to cope with the recent trend which requires the high power output per one machine and the convenience for maintenance, and the PMG is adequate for direct driven system and suitable for high-efficiency and light weight. So, the characteristics and technical trend of the PMG for wind turbine is examined. At last, a suitable technical trend for development of the permanent magnet generator for wind turbine is proposed.

### 1. 서 론

최근의 풍력발전기는 발전비용의 감소와 에너지 효율의 증가를 위해 단일기로는 수 MW급까지 대형화되었으며, 기어박스의 제거를 통한 시스템 구성의 단순화로 시스템 효율 및 유지보수가 용이한 직접구동 풍력발전기가 집중적으로 연구 개발되고 있다.

직접구동 방식은 기어의 제거를 통한 시스템 구성의 단순화로 기어와 관련된 유지보수의 편리성, 시스템 신뢰성을 향상시키며, 완전한 가변속 시스템으로 에너지 이용효율을 향상시킨다.

그러나, 직접구동 방식의 많은 장점에도 불구하고 대부분의 풍력시스템은 기어와 유도발전기로 구성된 간접구동방식이 사용된다. 주요 원인은 직접구동 시스템의 비용이 높기 때문이다. 연구결과에 따르면 권선형 회전자 동기기를 사용한 직접구동 방식의 비용은 간접구동 방식보다 크게 조사되었다. 직접구동 시스템의 가격구성은 풍력발전기의 비용이 매우 큰 비중을 차지하고, 1.5MW급 직접구동 시스템의 경우 권선형 동기발전기가 36%의 비중을 차지한다고 보고되었다.<sup>[1]</sup>

따라서, 풍력발전기의 비용절감은 매우 중요한 사항으로 비용감소를 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 권선형 동기발전기의 계자권선을 영구자석으로 대체하는 경우 발전기의 중량은 권선형 동기발전기보다 두 배정도 감소하고, 비용도 크게 감소된다고 보고되었다.<sup>[2]</sup>

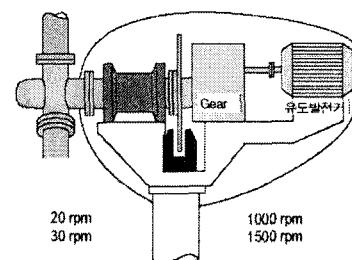
본 논문에서는 직접구동용 풍력발전기로 활발하게 연

구되고 있는 영구자석형 풍력발전기의 특징과 기술동향에 대한 조사를 통해 풍력발전기의 개발방향을 제시한다. 영구자석 풍력발전기로 여러 종류의 형식이 연구되어 왔으나, 영구자석 기기로 널리 사용되고 있는 RFPM(Radial-Flux Permanent Magnet)과 최근에 활발하게 연구되고 있는 AFPM(Axial-Flux Permanent Magnet) 및 TFPF(Transverse-Flux Permanent Magnet)발전기의 비용 및 토크밀도를 비교하여 직접구동 방식에 적합한 풍력발전기의 개발방향을 제시한다.

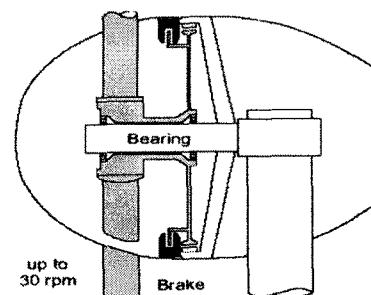
### 2. 본 론

#### 2.1 간접구동 방식과의 비교

일반적인 풍력발전의 전기기계 시스템은 터빈, 기어 및 발전기로 구성된다. 그럼 1은 기어와 유도발전기로 구성된 간접구동 풍력터빈과 영구자석 풍력발전기가 적용된 직접구동 풍력터빈을 나타낸다. 풍력터빈의 회전속도는 풍속에 따라 다르지만 20 rpm에서 200 rpm 범위로 회전한다.



a) 간접구동 풍력시스템



b) 직접구동 풍력시스템

그림 1 풍력터빈 전기기계 시스템

간접구동 풍력발전기의 회전속도는 1,000 또는 1,500 rpm으로 표준 유도발전기의 사용 및 계통에 적합적인 연결이 가능하다. 그러나, 기어의 정규적인 유지보수가 필요하며, 시스템의 무게 및 손실이 증가하고 속운전에 의해 소음이 증가하는 단점이 있다.

직접구동 풍력발전기는 터빈의 속도와 동일하게 회전하는 저속발전기로 기어의 제거로 시스템 구성이 단순하며 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

1)기어의 제거로 기어비용 및 기어변환 손실의 제거로 시스템 효율 및 신뢰성은 향상되나, 기존의 유도발전기에 비해 고가이고 손실이 크다.

2)유지보수비용이 저감된다.

3)간접구동 발전기와 기어는 부품간에 정확한 정렬이 요구되나, 직접구동 발전기는 나셀에 발전기만 설치되므로 부품간 정렬의 문제가 없고, 하우징 및 발전기의 지지구조물이 그림 1.b)와 같이 나셀의 주요부품으로 사용되어 모듈화 된 설계가 가능하다.

## 2.2 직접구동 풍력발전기

직접구동 발전기로는 권선형 동기발전기와 영구자석 동기발전기가 적용될 수 있으나, 권선형 동기발전기는 영구자석 동기발전기에 비해 무게 및 비용이 크므로, 여기서는 영구자석 동기발전기에 대해서만 언급한다.

풍력용 영구자석 발전기의 비용절감을 위해 여러 형식이 연구되어 왔으나, 대표적으로 상용화된 RFPM, AFPM 및 TFPN 형식의 발전기에 대해 단위토크에 대한 최소비용과 체적당 토크밀도를 비교하여 직접구동 방식에 적합한 풍력발전기의 개발방향을 제시한다.

### 2.2.1 RFM과 AFM과의 비교

AFPM의 고정자는 슬롯이 있는 구조와 슬롯이 없는 토러스(Torus)구조로 분류되며, Torus형식은 구조가 단순하지만 공극이 크게되어 자석의 두께가 슬롯이 있는 구조에 비해 크게되며, 외경이 동일한 조건에서의 발전기 비용은 RFPM보다 2배정도 크다.<sup>[3]</sup> 따라서, 비용절감이 유리한 슬롯구조의 AFPM과 RFPM을 비교한다.

최소비용/토크, 최대토크/체적 비교는 외경 1m에서 5m의 범위에서 두 기기의 토크가 동일한 조건에서 비교하였다. active material의 비용산출은 단위 kg당 가격을 기준하여 동과 철심의 가격은 6 Euro, 영구자석은 40 Euro로 계산하였다.

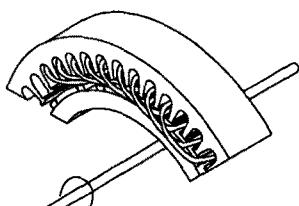


그림 2. RFPM 구조

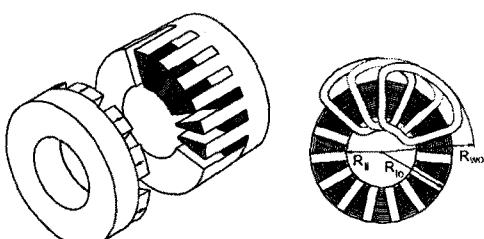


그림 3. AFPM 구조

표 1. 최소비용/토크 비교

외경 (m)	토크 (kNm)	치 수		비용/토크 (Euro/kNm)		토크밀도 (kNm/m <sup>3</sup> )	
		AFPM $K_R$	RFPM $L_r$ (m)	AFP	RFP	AFP	RFP
1.0	1.0	0.87	0.13	523	476	23	11
1.5	5.4	0.87	0.19	333	295	38	18
2.0	17.4	0.87	0.24	244	218	53	24
2.5	40.8	0.87	0.29	192	172	68	29
3.0	83.8	0.86	0.34	159	139	85	35
3.5	112.4	0.89	0.34	136	121	83	35
4.0	173.9	0.89	0.37	119	105	99	38
5.0	346.4	0.88	0.42	97	85	128	42

표 2. 최대토크/체적 비교

외경 (m)	토크 (kNm)	치 수		비용/토크 (Euro/kNm)		토크밀도 (kNm/m <sup>3</sup> )	
		AFPM $K_R$	RFPM $L_r$ (m)	AFP	RFP	AFP	RFP
1.0	2.0	0.64	0.16	728	440	38	15
1.5	9.6	0.63	0.24	478	279	62	24
2.0	26.8	0.66	0.29	330	205	86	30
2.5	65.4	0.66	0.36	261	159	110	37
3.0	129.7	0.66	0.43	220	128	134	43
3.5	241.7	0.66	0.52	187	108	159	49
4.0	384.8	0.65	0.60	167	95	183	51
5.0	758.0	0.65	0.72	141	78	229	53

최소비용/토크에 대한 계산결과는 표 1과 같이 RFPM이 AFPM에 비해 9%에서 12%범위로 작다. 여기서,  $K_R$ 은 AFPM의 고정자 외경/내경의 치수비율이며, RFPM의 축방향 길이( $L_r$ )는 엔드권선을 포함한 길이이다.

최대토크 /체적에 대한 계산결과는 표 2와 같다. AFPM의 최대토크가 발생하는 최적의  $K_R$  값은 모든 외경치수에 대해 0.66이다. 표 2로부터 알 수 있듯이 AFPM의 토크밀도는 RFPM보다 훨씬 우수하나, 비용은 RFPM이 AFPM에 비해 80%이상 저렴하다. 외경이 5m인 경우 AFPM의 토크밀도는 RFPM보다 4.3배 크나, AFPM의 비용은 80%정도 높다.

AFPM의 외경 대 내경의 치수비율( $K_R$ )은 표 1과 같이 최소비용/토크에 대한 비율은 0.88, 최대토크/체적에 대한 비율은 표 2와 같이 0.66이다. 외경이 5m인 경우  $K_R$ 의 변화에 대한 AFPM의 비용/토크 특성은 그림 4와 같이  $K_R$ 이 1에 가까울수록 비용이 감소된다. 또한, 토크밀도는 그림 5와 같이  $K_R$ 이 0.66인 경우 최대가 된다.

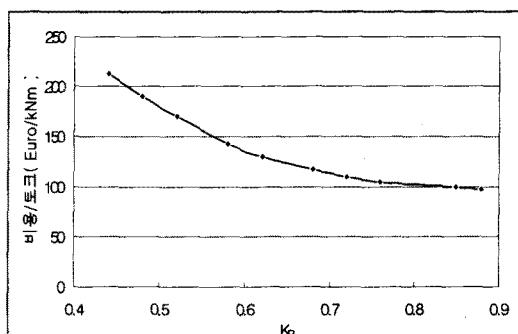


그림 4. AFPM의  $K_R$  대 최소비용/토크 특성 (외경 5m)

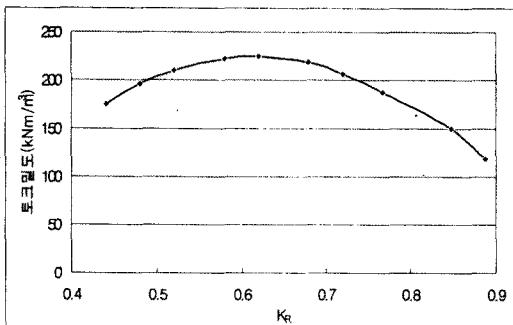


그림 5. AFPM의  $K_R$  대 토크밀도 특성 (외경 5m)

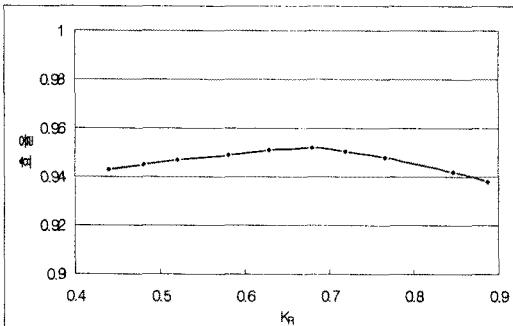


그림 6. AFPM의  $K_R$  대 효율 특성 (외경 5m)

직접구동 발전기의 비용절감은 토크밀도 증가를 통한 체적감소보다 중요한 사항으로  $K_R$ 의 값이 높을수록 유리하나, 발전기의 효율을 고려하여 결정되어야 한다.

그림 6은 외경이 5m인 발전기의 제약조건이 최소비용/토크인 경우의  $K_R$ 변화에 대한 효율 특성을 나타낸다.  $K_R$ 이 1에 가까울수록 엔드권선의 길이가 커지기 때문에 발전기 동순이 증가되어 효율이 저감된다. 따라서, AFPM의 비용과 효율을 고려한  $K_R$ 의 범위는 0.75에서 0.80 사이이다.

표 3은 AFPM의 효율을 고려하여  $K_R$ 이 0.78인 경우 동일한 토크가 발생하는 조건에서 AFPM과 RFPM의 최소 비용/토크에 대한 계산결과다. 표 3에서 알 수 있듯이 AFPM의 효율 및 비용을 고려하여 계산 된 결과는 RFPM 보다 비용이 22%정도 크다.

표 3. 최소비용/토크 ( $K_R=0.78$ )

외경 (m)	토크 (kNm)	비용/토크 (Euro/kNm)		토크밀도 (kNm/m <sup>3</sup> )		효율 (%)	
		AFP M	RFP M	AFP M	RFP M	AFPM	RFPM
1.0	2.0	551	434	33	16	90.0	90.0
1.5	9.7	354	280	53	24	91.8	91.3
2.0	31.2	260	201	73	32	92.8	92.7
2.5	66.0	206	158	95	37	93.6	93.3
3.0	116	168	130	113	41	94.3	94.3
3.5	189	146	111	135	44	94.6	94.6
4.0	260	127	99	147	45	94.6	94.9
5.0	516	105	81	187	48	94.5	94.7

직접구동 풍력발전기로 AFPM과 RFPM의 비교결과를 요약하면 다음과 같다.

1) AFPM의 토크밀도는 RFPM에 비해 발전기 외경 치수에 따라 2배에서 5배정도로 크게되어 축방향 두께가 훨씬 작아진다. 따라서, 체적 또는 무게감소면에서 RFPM보다 훨씬 유리하다.

2) AFPM의 비용이 최소화되는 조건, 즉  $K_R$ 이 0.88인 경우의 AFPM의 비용은 RFPM에 비해 12%정도 높고,  $K_R$ 을 0.78로 하여 효율특성을 고려한 경우는 약 22%정도 높다.

3) 결과적으로, 풍력발전기 적용을 위해 비용절감이 토크밀도 증가보다 훨씬 중요한 사항이므로 RFPM이 AFPM보다 적합하다고 할 수 있다.

### 2.2.2 RFPM과 TFPMP과의 비교

TFPM은 자속의 방향이 회전자와의 이동방향에 대해 횡방향을 가지는 기기로 전류의 방향은 회전자와 같은 방향으로 흐르도록 구성된다. TFPMP은 전류발생을 위한 권선 공간과 자속 발생을 위한 자기회로 공간이 상충되는 RFPM과 달리 독립적인 구조로 극간격의 크기를 작게 할 수 있으며, 오버행이 없는 링 형태의 권선으로 동의 양을 줄일 수 있다. 따라서, 작은 극 간격에 큰 전기장하가 가능한 구조로 높은 토크밀도가 가능하기 때문이다.

그림 7은 RFPM과 비교를 위한 TFPMP의 구조이다. 비용 계산을 위한 철심, 동 및 영구자석의 비용은 2.2.1절에서 검토 된 비용을 동일하게 적용하였으며, RFPM의 구조는 그림 2와 동일하다.

직접구동 풍력발전기의 중요한 항목은 2.2.1절에서 검토 된 바와 같이 토크밀도 보다는 비용감소가 보다 중요한 항목이므로, 여기서는 최소비용/토크를 비교기준으로 하였고 계산조건은 다음과 같다.

1) 발전기 외경은 0.5m에서 4m, 공극 길이는 0.5mm에서 4mm로 범위로 하였다.

2) 주어진 외경과 공극에 대해 TFPMP와 RFPM의 효율 92%로 동등한 조건에서 최소비용/토크를 계산하였다.

위의 조건에 대한 최소비용/토크를 계산한 결과는 그림 8과 같으며, RFPM의 비용/토크는 공극변화에 거의 영향이 없으나 TFPMP은 공극 변화에 매우 민감하다. 그림 8은 TFPMP이 RFPM에 비해 공극 변화에 따른 비용이 우수한 정도를 나타내는 곡선으로, TFPMP이득 계수는 다음과 같다.

$$K_{TFPM-COST} = \frac{RFPM\text{의 비용/토크}}{TFPM\text{의 비용/토크}}$$

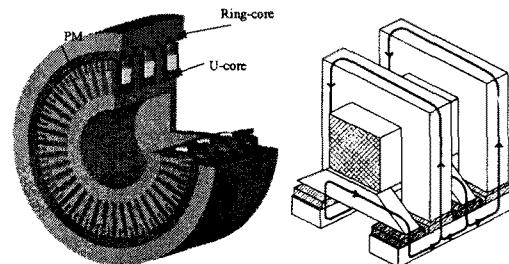


그림 7. TFPMP 구조

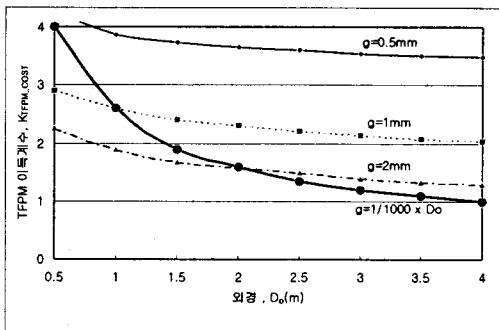


그림 8. 공극변동에 따른 TFPFM 이득계수

공극이 0.5mm인 경우 TFPFM은 RFPM에 비해 약 4배 이상 비용이 저렴하나 공극이 증가할수록 저감한다. TFPFM의 이득계수를 고려하여 직접구동용으로 TFPFM을 사용하는 경우 TFPFM의 유효공극은 3mm 정도까지가 적절하다. 그러나, 발전기 용량이 대형화됨에 따라 발전기 직경은 커지게 되어 공극을 적게 유지하는 것은 매우 어렵다. 일반적으로 풍력발전기 직경이 1/1000 정도의 공극으로 제작된다고 볼 때 3m이하의 직경에서만 TFPFM이 유리하다.

결과적으로, TFPFM과 RFPM의 공극변화에 대한 비용검토 결과는 active material의 재질만을 고려하여 계산된 결과로서 제작성을 고려한 경우의 공극은 더욱 증가되어 TFPFM의 이득계수는 그림 8보다 감소 할 것이다. 더욱이 풍력발전기로 상용화 된 500kW급의 발전기의 공극은 최소한 2.2mm 이상이고, 최근의 풍력발전기는 발전비용 감소를 위해 MW급 이상으로 대형화되는 추세임을 감안하면 500kW급 이상의 발전기는 RFPM 타입이 유리할 것으로 사료된다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 기어가 필요 없는 직접구동 풍력발전시스템의 특징과 직접구동 풍력발전기로 소형경량화 및 고효율화가 용이하여 단위기계의 대용량화, 유지보수의 편리성이 요구되는 최근의 기술추세에 대응하여 급격한 기술발전을 하고 있는 영구자석 풍력발전기의 기술동향을 확인 할 수 있었다.

직접구동 방식은 시스템 효율, 신뢰성 및 에너지 이용효율 향상 등의 장점을 갖고 있으나, 기존의 방식보다 비용이 높기 때문에 현재까지 대부분은 간접구동 방식이 사용되고 있다. 특히, 풍력시스템의 가격구성 중 매우 큰 비중을 차지하고 있는 풍력발전기의 비용절감이 매우 중요함을 확인하였다.

따라서, 직접구동 풍력발전기로 권선형 동기발전기에 비해 소형경량화, 고효율화로 비용절감이 용이한 영구자석 발전기로 활발하게 연구되는 RFPM, AFPM 및 TFPFM에 대한 비용 및 토크밀도를 비교하였다.

AFPM은 RFPM에 비해 토크밀도가 2배에서 5배정도 우수하여 소형경량화 측면은 유리하나 동일한 외경 및 성능조건에서 비용이 22%정도 높다. 따라서, 풍력발전기로는 비용의 절감이 훨씬 중요한 사항임을 감안하면 RFPM이 유리하다.

TFPM은 RFPM과 달리 공극 변화에 매우 민감하며, 공극이 3mm이하인 경우에만 RFPM에 비해 비용절감이 유리하다. 또한, 풍력발전기로 상용화 된 500kW급의 발전기의 공극은 최소한 2.2mm 이상이고, 최근의 풍력발전기는 MW급 이상의 대형화 추세임을 감안하면 RFPM 유리 할 것으로 사료된다.

결과적으로, AFPFM 및 TFPFMM은 RFPM에 비해 토크밀도가 높아 소형·경량화는 유리한, 발전기의 비용을 고려하면 풍력발전기로는 RFPM이 적합함을 확인하였다.

향후에는 직접구동 영구자석 풍력발전기의 고유기술 확보뿐만 아니라 풍력 시스템의 국산화를 위해 터빈, 발전기 및 컨버터 제조업체와 전문 연구기관과의 협조시울을 통한 연계개발이 필요하리라 판단되며, 본 기술동향조사연구가 풍력발전 기술발전에 조금이라도 기여하기를 희망한다.

### (참 고 문 헌)

- [1] Bohmeke G., Boldt R., Beneke H., "Direct Drive, Geared Drive, Intermediate Solutions-Comparison of Design Feature and Operating Economics", EWEC, Ireland, p. 664-667, 1997
- [2] Hatkopp T., Hofmann M., Jockel S., "Direct Drive Generator for Megawatt Wind Turbines", EWEC, Ireland, p. 668-671, 1997
- [3] M.R. Dubois, H. Polinder, J.A. Ferreira, "Comparison of Generator Topologies for Direct-Drive Wind Turbines", Proc. of th Nordic Countries Power & NORPIE, Denmark, p. 22-26, 2000
- [4] M.R. Dubois, H. Polinder, J.A. Ferreira, "Axial and Radial-Flux Permanent Magnet Generator for Direct-Drive Wind Turbines", EWEC, 2001
- [5] M.R. Dubois, H. Polinder, J.A. Ferreira, "Influence of Air Gap Thickness in Transverse Flux Permanent Magnet(TFPF) Generator for Wind Turbine Application", IEEE Yonung Researcher Symposium, PELS, Leuven, Belgim, 2002
- [6] Grauers A., Design of Direct-driven Permanent-Magnet Generators for Wind Turbines, PhD Thesis, Chalmers University, Goteborg, Sweden, 1996
- [7] G. Henneberger, M. Bork, "Development of a New Transverse Flux Motor", IEE, Savoy Place, London, 1997
- [8] Lampola, P. 1999: Low-Speed Permanent-Magnet Generators for Gearless Wind Turbines, Helsinki University of Technology, Laboratory of Electromechanics, Report, No. 62, Espoo, Finland, 2000, 24 p. Submitted to European Transactions on Electrical Power (ETEP) July 12, 1999.