

Design Technology Trend of Permanent Magnet Generators for Wind Turbines

Gang-Hyeon Jang, Woo-Hyeon Kim, Hyo-Seob Shin, and Jang-Young Choi*

Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 34134, Korea

(Received 21 June 2021, Received in final form 25 June 2021, Accepted 25 June 2021)

This paper deals with design technology trend of permanent magnet generators (PMGs) for wind turbines. First, the classification and characteristics of each type of PMGs were investigated, and then the characteristics, advantages and disadvantages for each PMGs type were compared and analyzed. In addition, the specifications and capacities of PMGs currently being developed at domestic and abroad are summarized. In particular, based on the papers published in the last 10 years, research trends related to design and analysis of PMGs were described. The results presented in this paper will be useful criteria in design and analysis of PMGs for wind turbines.

Keywords : design technology, permanent magnet generators, wind turbines, permanent magnet generator

영구자석 풍력발전기의 설계 기술 동향

장강현 · 김우현 · 신효섭 · 최장영*

충남대학교 전기공학과, 대전시 유성구 대학로 99, 34134

(2021년 6월 21일 받음, 2021년 6월 25일 최종수정본 받음, 2021년 6월 25일 게재확정)

본 논문은 풍력에너지 변환용 영구자석 발전기의 설계 기술 동향 분석에 대해 다루었다. 먼저, 풍력발전용 영구자석 발전기의 타입별 분류와 특징에 대해 기술하고 특징, 장·단점들을 비교 분석하였다. 또한 관련 문헌 조사를 통해 얻어진 발전기들의 제원으로부터 현재 국내·외에서 개발되고 있는 영구자석 발전기의 사양과 용량 등을 정리하였다. 특히, 최근 10년간 게재된 논문들의 결과를 분석하여 영구자석 발전기와 관련된 연구 동향에 대해서도 기술하였다. 본 논문은 풍력에너지 변환용 영구자석발전기의 타입 선정과 설계 및 해석 시 고려해야할 부분 등을 결정하는 데 매우 유용할 것으로 사료된다.

주제어 : 풍력에너지, 영구자석 발전기, 설계 기술

I. 서 론

화석연료의 고갈과 화석연료 사용으로 인한 탄소배출, 이에 따른 환경오염 및 대기온도 상승으로 인한 기후 문제가 전 세계적으로 관심이 집중되는 가운데, 세계 각 국은 기존 화석에너지를 태양광, 풍력, 해양에너지, 수소에너지 등의 신재생에너지로 대체하기 위해 관련기술개발 및 보급화에 노력하고 있다. 다양한 신재생에너지 중 풍력발전은 초기 설치비용이 높고 육상풍력발전을 위한 입지선정의 문제나 해상풍력의 경우 해상에 설치하기 위한 비용과 기술력 등이 해결되어야 할 과제로 남아있지만, 다른 신재생에너지를 이용한 발전방식에 비해 설치 면적 대비 전력생산량이 높다는 장점이 있다.

따라서 세계 여러 나라에서 풍력발전을 이용한 재생에너지 발전 점유율을 높이기 위한 다양한 연구들이 수행되고 있다. 풍력발전 시스템은 Fig. 1과 같이 크게 풍력 터빈, 발전기, 전력변환장치(PCS)등의 요소로 구성 되는데, 이 중 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는 발전기에 대한 연구와 기술개발의 중요성이 계속하여 증가하고 있다. 영구자석 발전기는 높은 에너지 밀도를 가지고 있는 희토류 자석을 사용하기 때문에, 다른 발전기에 비해 경량화 및 소형화에 유리하고 고효율 발전이 가능하다는 장점 또한 갖고 있다.

본 논문에서는 풍력에너지 변환용 영구자석 발전기의 최근 연구동향 분석을 위해, 최근 10년 동안 발표된 논문들과 국내·외에서 작성된 보고서를 조사하였다. 조사된 자료들로부터 영구자석 발전기를 타입별로 분류하고, 분류된 타입들에 대한 특징들을 기술하였으며, 국내·외 풍력 발전기 개발 현황을 정리하였다. 특히, 논문에서 제시된 결과 등을 분석하여 영구자석

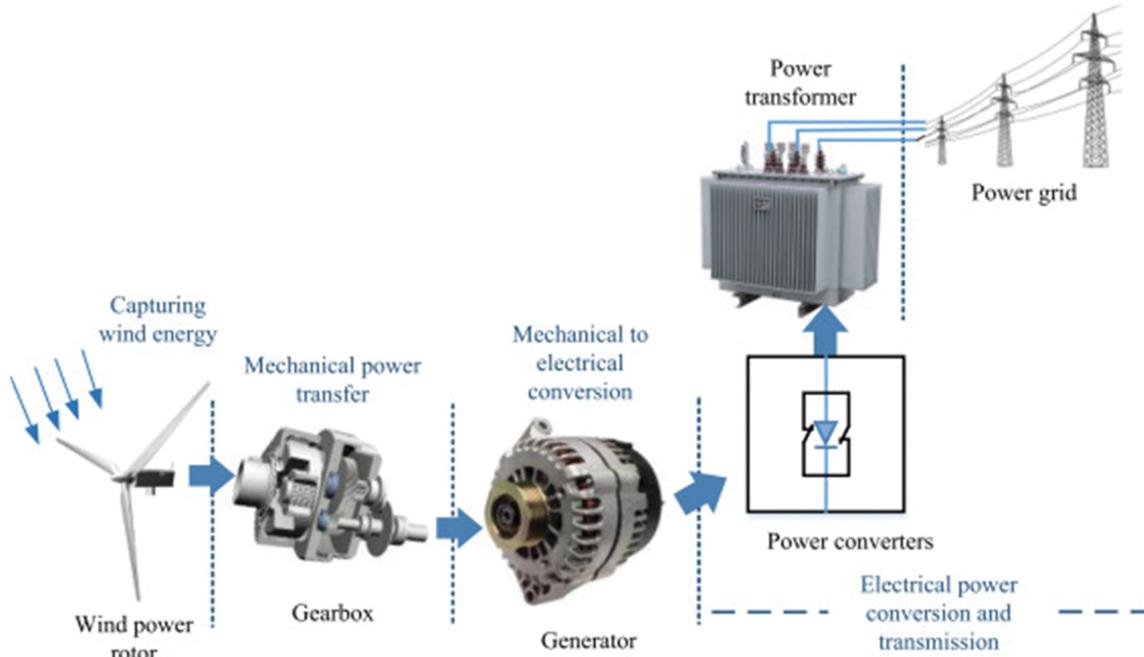


Fig. 1. (Color online) Conceptual diagram of wind power generation system [1].

발전기의 설계 및 해석관련 연구동향을 자세하게 정리하였다. 본 논문의 내용은 향후 풍력에너지 변환용 영구자석기 타입 선정 및 설계에 중요한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

II. 본 론

1. 영구자석 풍력발전기의 특징과 타입별 분류

영구자석 발전기는 다양한 타입과 구조로 분류될 수 있는데, 본 논문에서는 영구자석 발전기를 기어박스 유무, 영구자석 자속 방향 및 회전자 위치에 따라 분류하고, 분류된 항목에 대한 각각의 특징 및 장·단점들을 정리하였다.

1.1 기어박스 유무에 따른 분류

Fig. 2와 같이, 풍력발전용 영구자석 발전기는 크게 기어박스를 사용하지 않는 기어리스 타입과 기어박스를 사용하는 기어드 타입으로 구분될 수 있다. Table I에서 각각의 타입별 특징과 장단점을 제시하였다[2].

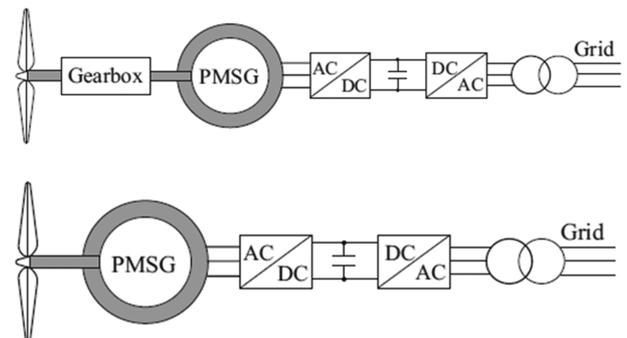


Fig. 2. Comparison of permanent magnet generators with and without gearbox.

1.2 영구자석 발전기의 자속 방향에 따른 분류

영구자석 발전기는 자속방향에 따라, 반경 방향 자속(Radial Flux) 타입과 축방향 자속(Axial Flux) 타입으로 나눌 수 있으며, 세부적인 구조 및 장단점은 Table II에 제시된 바와 같다[3,4].

Table I. Characteristics according to the driving method of the permanent magnet generator.

| Type | Features | Advantages | Disadvantages |
|-------------------|---|--|--|
| Direct-drive type | <ul style="list-style-type: none"> - Gearless implementation - Increase in generator size - Low speed, high torque | <ul style="list-style-type: none"> - Low maintenance costs | <ul style="list-style-type: none"> - Cost increased due to need for large amount of magnet |
| Geared type | <ul style="list-style-type: none"> - Decrease in generator size | <ul style="list-style-type: none"> - Reduced nacelle weight due to reduced generator size | <ul style="list-style-type: none"> - Maintenance problems due to the use of gearboxes, low efficiency |

Table II. Classification according to magnetic flux direction of permanent magnet wind turbine.

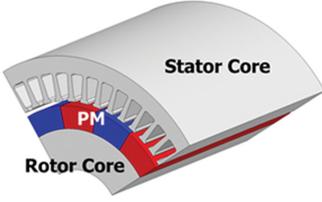
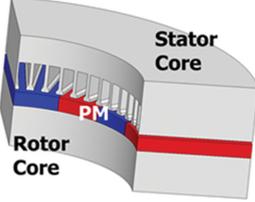
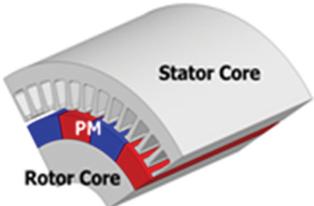
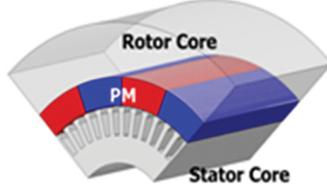
| | Radial flux machine | Axial flux machine |
|------------------------------|--|--|
| Shape |  |  |
| Structural feature | Radial magnetization | Axial magnetization |
| Advantages/ Disadvantages | <ul style="list-style-type: none"> - High torque/mass ratio - Difficulty in manufacturing slotless stator - Easy to maintain uniform airgap - Ease of stacking stator cores - Relatively small use of permanent magnets | <ul style="list-style-type: none"> - Simple stator winding implementation - High torque/volume ratio - Easy to manufacture slotless stator - Difficult to maintain uniform airgap - Stator core stacking difficulties - High usage of permanent magnet |

Table III. Comparison of inner and outer rotor permanent magnet machines.

| | Inner rotor machine | Outer rotor machine |
|------------------------------|--|---|
| Shape |  |  |
| Structural feature | Internal rotor | External rotor |
| Advantages/ Disadvantages | <ul style="list-style-type: none"> - Due to the large diameter of the stator, there is plenty of space for winding design. - Increased winding resistance due to relatively large stator diameter - Relatively small magnet usage | <ul style="list-style-type: none"> - Since the end turn is short, the inductance is small and the winding resistance is reduced. - Complex mechanical structure - Severe vibration/noise compared to the internal type |

1.3 회전자 위치에 따른 분류

영구자석 회전자의 위치에 따라서 회전자가 고정자 안쪽에 위치하는 내전형 영구자석 기기와 고정자 바깥쪽에 위치해서 회전하는 외전형 기기로 분류 된다[5-8]. 대표적인 형상과 특징, 장/단점을 Table III에 정리하였다.

2. 영구자석 풍력발전기 개발 동향

2.1 국내 개발 동향

유럽 및 북미 등 풍력발전기의 개발이 활발하게 이루어진 풍력 선진국과 비교하여 국내의 풍력발전기 개발은 미흡한 실정이나, 후발주자임을 감안하면 선진국과의 기술격차를 줄이면서 비교적 빠르게 진행되고 있다. 한국에너지공단과 중소기업청의 기술 보고서에 의하면 소형 풍력발전기는 중소기업을 중심으로 개발이 이루어지고 있으며 이중 발전기 부분을 연구 개발하는 대표 기업으로 선택, 한국신재생에너지(주), (주)금풍 등을 언급하고 있다. 육상풍력용 소형 풍력발전기는 (주)



Fig. 3. (Color online) Seoltech, 100kW-Class Wind turbine generator (Direct-Drive 50 rpm, 24.4 m × 11.7 m) [9].

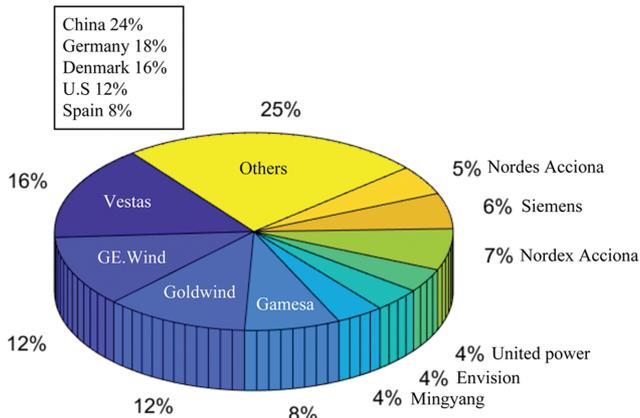


Fig. 4. (Color online) Market share of major wind power companies (Renewables 2017 Global Status Report).

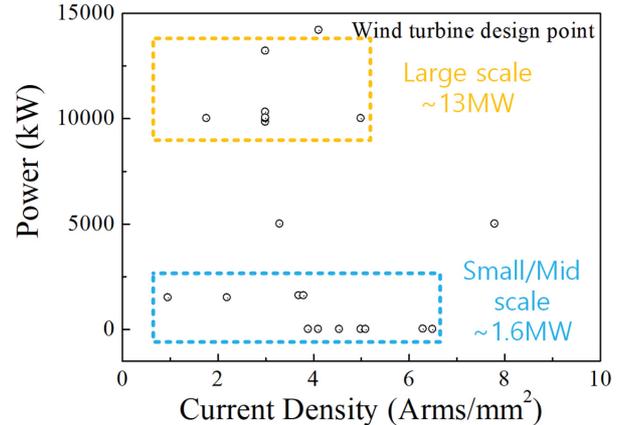


Fig. 5. (Color online) Research on permanent magnet generators in papers published in the IEEE journal for the last 10 years.

금풍에서 200 W~10 kW, 선택에서 3 kW~100 kW급, (주) GU에서 5 kW, 15 kW, 25 kW급 개발을 완료하였다. Fig. 3은 선택에서 개발한 100 kW급 직접구동형 풍력발전기를 보여준다. 또한 대용량 해상풍력용 발전기 개발은 유니슨과 두산중공업이 필두로 사업이 진행 중이며 유니슨은 대형 풍력발전단지(영덕, 강원) 개발 사업을 진행하였고 두산중공업은 국내 기업 가운데 최초로 상업용 해상풍력단지인 탐라해상풍력발전소를 설치한 이력이 있다. 두산중공업은 3~8 MW급의 풍력발전기를 개발, 보유하고 있으며, 유니슨 2 MW, 4 MW의 풍력발전기 개발을 완료, 현재는 8 MW급 이상의 발전기 개발을 진행 중이다[9].

2.2 해외 개발 동향

해외 풍력발전기 개발 현황을 살펴보면 10대 주요 풍력발전 공급업체가 세계 시장의 75% 이상을 점유하고 있는 것으로 알 수 있다. 주로 Vestas(덴마크), Enercon(독일), Gamesa(스페인) 등 유럽 업체들은 부품부터 단지 개발까지 가치사슬 전반에 걸친 높은 기술력을 보유한 업체들이며 특히 Vestas

는 70여개 국가에 45,000기 이상의 풍력발전기를 공급한 실적을 보유하고 있다. 이 외에도 Goldwind(중국), Sinovel(중국), GE Wind(미국), Siemens(독일) 등의 업체들이 글로벌 업체로 성장하고 있는 상황이다[2,10]. Fig. 4에서 주요 기업별 및 국가별 풍력발전 사업개발 현황을 볼 수 있다. 과거에는 덴마크와 독일을 선두로 풍력발전기 시장을 선점하는 추세였지만 최근에는 공격적인 투자와 연구개발을 바탕으로 점점 중국 기업의 시장 비중이 높아지는 추세이다. Table IV는 주요 기업들의 영구자석 풍력 발전기 개발 현황을 보여준다. 대부분 입지조건이 우수하며 에너지 밀도가 높은 해상풍력을 위한 대용량 풍력발전기의 개발들이 이루어지고 있으며 최대 8MW 급의 발전기도 개발되었다. 또한 대부분의 영구자석 발전기는 가변속도 운전방식을 기반으로 하고 있으며 단단, 다단의 기어박스를 사용하기도 하고 기어박스를 사용하지 않는 직접구동 방식도 사용되고 있다.

3. 영구자석 발전기 연구 동향

최근 10년간 풍력발전용 영구자석 발전기와 관련하여 게재

Table IV. Development status of wind power generators.

| Speed range | Gear-box | Power | Company | Reference |
|-----------------------------|-------------------------|-------------------|--------------|-----------|
| Variable speed driving type | Multi-stage | 4 MW | Vestas | [11] |
| | | 2.5 MW | GE Wind | [12] |
| | | 3.0 MW | WinwinD | [13] |
| | | 4.5 MW, 5.0 MW | Gamesa | [14] |
| | Direct-drive (gearless) | 8.0 MW | Vestas | [11] |
| | | 4.0 MW | GE wind | [12] |
| | | 3 MW, 6 MW | Siemens wind | [15] |
| | | 1.5 MW, 2.0 MW | STX wind | [16] |
| | | 1.5 MW, 2.5 MW | Goldwind | [17] |
| | | Single-stage | 1.0 MW | WindwinD |
| | 5.0 MW | Multibrid (Areva) | [18] | |

Table V. Research trends related to the design of permanent magnet generators.

| | Theme | Reference |
|----------------------------|---|-----------|
| Permanent magnet generator | Generator design considering multi-physics | [19-22] |
| | Magnetic gear applied generator proposal | [23-26] |
| | Proposal of novel generator and verification | [27-31] |
| | Generator design method Proposal | [32-33] |
| | Generator sizing equation establishment and analytical technique, loss analysis, demagnetization analysis | [34-42] |
| | Application and proposal of optimal generator design method | [43-50] |

된 논문들을 분석해 본 결과 다양한 출력과 사이즈별로 연구가 진행되어 왔음을 확인할 수 있다. Fig. 5는 최근 게재된 논문들에서 제시된 발전기의 용량과 전류밀도의 분포를 보여 준다. 주로 발전기의 설계와 최적설계, 제어기법 등과 관련된 연구가 수행되어 왔고 작게는 수 kW 용량의 발전기에서 크게는 10 MW급 이상의 발전기까지 연구가 진행되었다. Table V는 영구자석 발전기의 설계나 해석, 최적화 기법과 관련된 논문을 분류한 것이다.

3.1 발전기 설계, 해석 및 최신동향

Fig. 6은 영구자석 발전기 설계를 위한 일반적인 순서도이다. 먼저 발전기의 정격 출력과 속도 산정, 사이즈 선정을 하고 난 후 발전기의 초기설계를 수행한다. 초기설계에는 회전자 크기 선정, 극-슬롯 조합 선정, 재질선정, 고정자 형상 설계 등을 수행하고 세부적으로 냉각조건을 고려하여 전류밀도를 만족하는 고정자의 권선설계를 수행하여 출력이나 발전전

압 등의 요구 조건에 맞는 역기전력과 저항, 인덕턴스 등의 회로정수를 결정한다. 다음으로 회전자 및 고정자의 세부형상, 제작성을 고려한 권선사양 등의 최적설계를 통해 역기전력 THD의 감소, 코깅토크 저감 및 고정자 코어의 적절한 포화도 선정 등을 하게 된다. 또한 세부 전자기 해석을 통해 발전기의 동손, 철손, 영구자석 와전류 손의 전자기 손실값 들을 확인하고 발전기의 효율과 출력조건을 검토함으로써 전자기 설계를 완료하게 된다. Fig. 7은 영구자석 발전기의 고정자 철손, 회전자 와전류 손실 분포의 예를 보여준다. 상용 유한요소해석 소프트웨어를 이용하여 부하해석을 수행하게 되면 이와 같은 손실량과 손실 분포를 확인할 수 있다. Fig. 8은 영구자석 발전기의 기계-전기 에너지 변환 흐름도이며, 이로부터 발전기의 입력과 출력 관계를 정의하고 발전기의 성능, 효율을 산정할 수 있다.

또한, 전자기 가진원으로 작용할 수 있는 토크 리플, 코깅 토크, 불평형 전자기력(UMF), 전자기력 분포(MPF) 등의 해석을 수행하고, 발전기의 기계적 안정성 확보를 위해 회전체에 발생하는 응력, 고정자의 강성해석 및 고유진동수 해석 등을 수행하여, 설계된 발전기가 기계적으로 강인하고, 공진 문

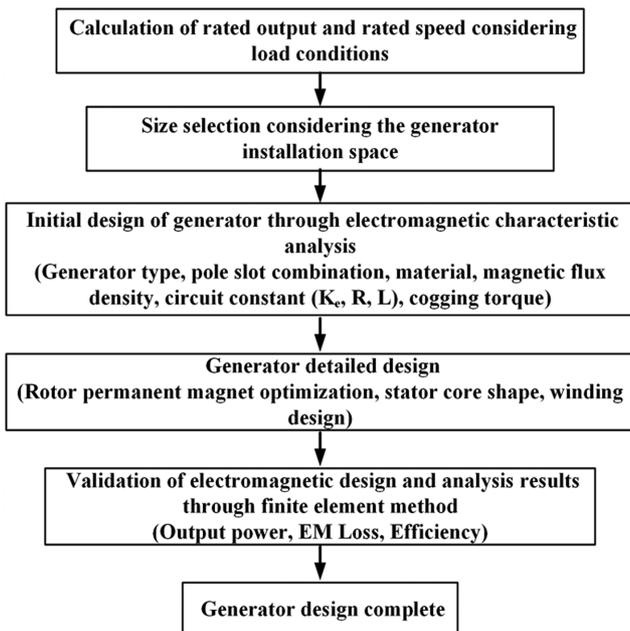


Fig. 6. General design flowchart of a permanent magnet generator.

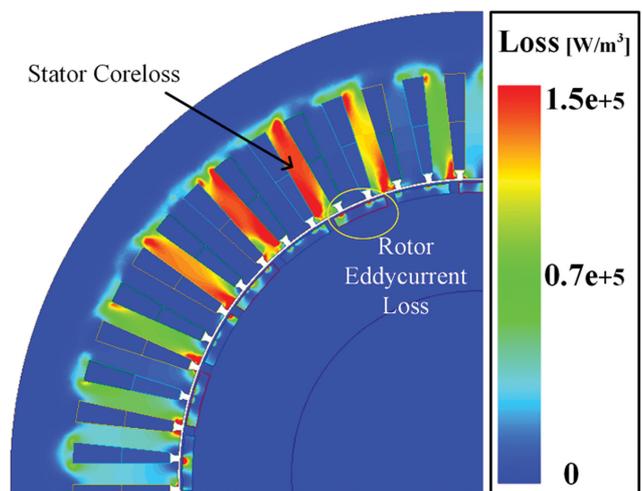


Fig. 7. (Color online) Distribution of core loss and rotor loss of permanent magnet generator.

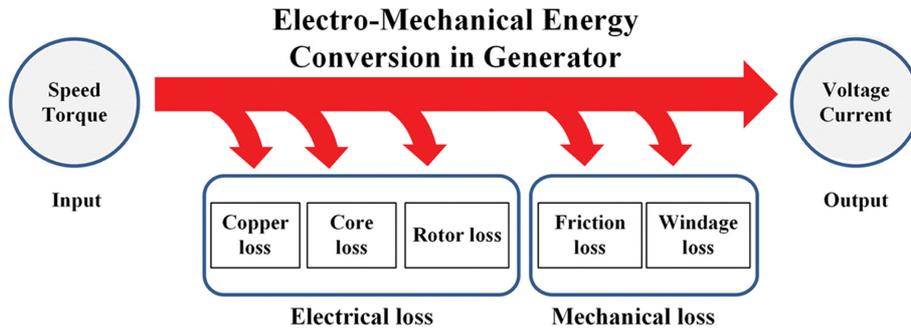


Fig. 8. (Color online) Electro-mechanical energy conversion flow of permanent magnet generator.

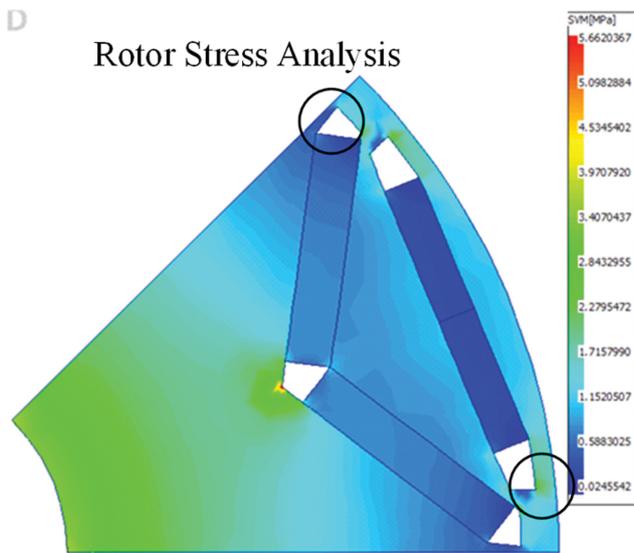


Fig. 9. (Color online) Permanent magnet generator rotor stress analysis.

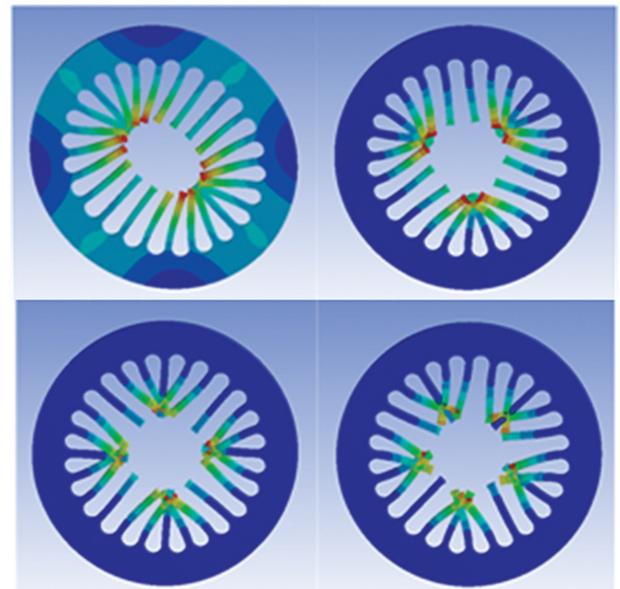


Fig. 10. (Color online) Stator mode analysis of permanent magnet generator.

계가 없는지 확인절차가 필요하다. Fig. 9는 매입형 회전자 구조를 갖는 영구자석 발전기의 기계구조해석 예시를 보여준다. 이와 같은 해석을 통해 회전체의 각 부분에 발생하는 응력을 확인할 수 있으며 회전자 코어, 영구자석 등의 재질이 갖고 있는 항복응력과 비교하여 안정도를 예측할 수 있다. Fig. 10은 영구자석 발전기의 고정자 코어의 모드해석 예시를 보여준다. 이와 같은 해석을 통해 고정자 코어의 각 모드에서의 고유진동수를 확인하여 운전영역에서 공진에 문제 등을 확인할 수 있다.

Fig. 11은 영구자석 감자해석 예이다. 영구자석은 외부 온도나 외부 자계에 의해 자속밀도가 감소하는데, 만약 영구자석이 원래의 성능으로 회복하지 못하는 불가역감자가 일어나는 경우, 발전기의 성능에 악영향을 미치기 때문에 감자해석은 필수이다. 보통 해석을 수행할 때, 정격 온도와 정격 전류 조건보다 더 가혹한 조건에서 감자해석을 수행하여 설계의 안전성을 확인한다. 특히, 3상 단락조건에서의 전류 등을 활용

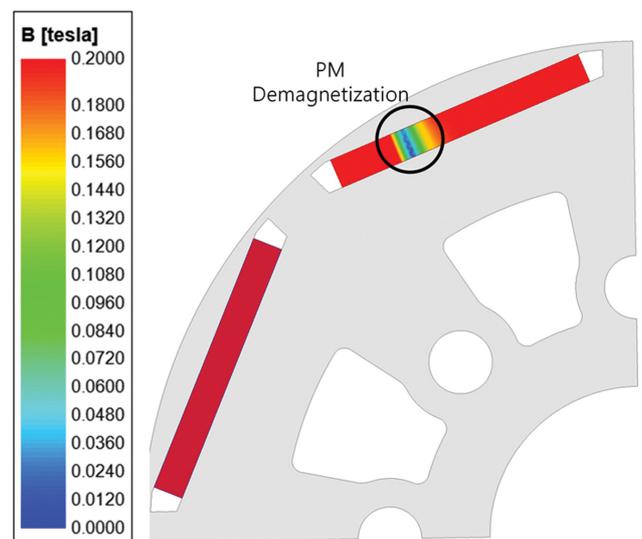


Fig. 11. (Color online) Demagnetization analysis of permanent magnet generator.

하여 감자해석을 수행하는 것이 일반적이다.

최근 고전적인 설계기법이 아닌 다중물리 해석을 기반으로 한 설계나 손실해석, 구조강도 해석, 열 해석과 관련된 연구들이 수행되고 있으며[19-22], 기어박스를 대체하기 위한 마그네틱 기어를 적용한 발전기의 설계와 같은 연구도 수행되고 있다[23-26]. 또한 이중 회전자나 이중 고정자 등과 같이 기존에 많이 쓰이던 일반적인 형태와 다른 새로운 형태의 발전기 설계의 가능성 및 다당성에 관한 연구들도 수행되고 있다[27-31]. 발전기의 특성이나 철손, 영구자석 와전류손실 해석과 관련된 연구로서는 주로 유한요소해석법이나 공간고조파법, 자기등가회로법 등을 활용한 연구가 이뤄지고 있으며 최근에는 복잡한 치슬롯 구조를 정확하게 해석하기 위한 서브도메인법을 이용한 해석적 기법 등의 주제로 연구가 주로 수행되고 있다[34-42].

3.2 발전기 최적화 설계 기술 동향

발전기 최적설계 기법은 크게 확률론적 알고리즘과 근사 최적화 기법 두 가지로 분류된다. Fig. 12의 (a)와 (b)는 각각 확률론적 알고리즘과 근사최적화 기법의 최적화 설계에 대한 순서도이다. 유전알고리즘(Genetic Algorithm, GA) 및 개인 집단최적화(Particle Swarm Optimization, PSO)와 같은 확률론적 알고리즘의 경우 목적함수의 함수 값만이 필요하고 전역 최적해 탐색능력이 뛰어난 장점이 있지만, 알고리즘의 많은 반복이 요구되어 상당한 시간이 소요되며 3차원 해석이

필요한 경우에는 적용되기 어렵다. 반면 반응표면분석법(Response Surface Methodology, RSM) 및 크리깅(Kriging)과 같은 근사최적화 기법은 실험점을 통해 목적함수의 회귀 모델을 생성하고 최적지점을 탐색하기 때문에, 전역 최적해 탐색능력은 비교적 떨어지지만 소요시간이 적어 3차원 해석이 필요한 경우에도 적용가능한 장점이 있다. 이러한 기법들을 이용하여 최근 GA 및 PSO 알고리즘을 이용한 최적설계가 다루어졌으며[43,44,49], RSM 및 Taguchi 기법 이용한 최적설계도 수행되었다[46,50]. 또한 NSGA-III 알고리즘을 이용하여 축방향자속 영구자석기기(AFPM SM)의 강건 최적설계가 수행된 바 있다[48].

III. 결 론

본 논문에서는 영구자석 풍력발전기의 설계 기술 동향에 대해서 다루었다. 신재생에너지 중 풍력발전시스템에 사용되는 영구자석 발전기의 타입별 그리고 형상별 분류를 통해 각 발전기의 특징과 장단점을 정리하였고 관련 문헌조사를 통해 국내·외의 풍력발전기 개발 현황을 조사하고 정리하였다. 또한 영구자석 발전기와 관련된 최근 10년간 게재된 논문들을 조사하여 연구 주제에 따라 분류하고 설계 해석에 관련된 연구를 정리하여 연구 동향을 분석하였다. 본 논문과 참고문헌은 풍력에너지 변환용 영구자석기기의 타입 선정 방법과 설계 및 해석 시 고려해야할 부분 등과 같은 자료를 얻는데 유용할

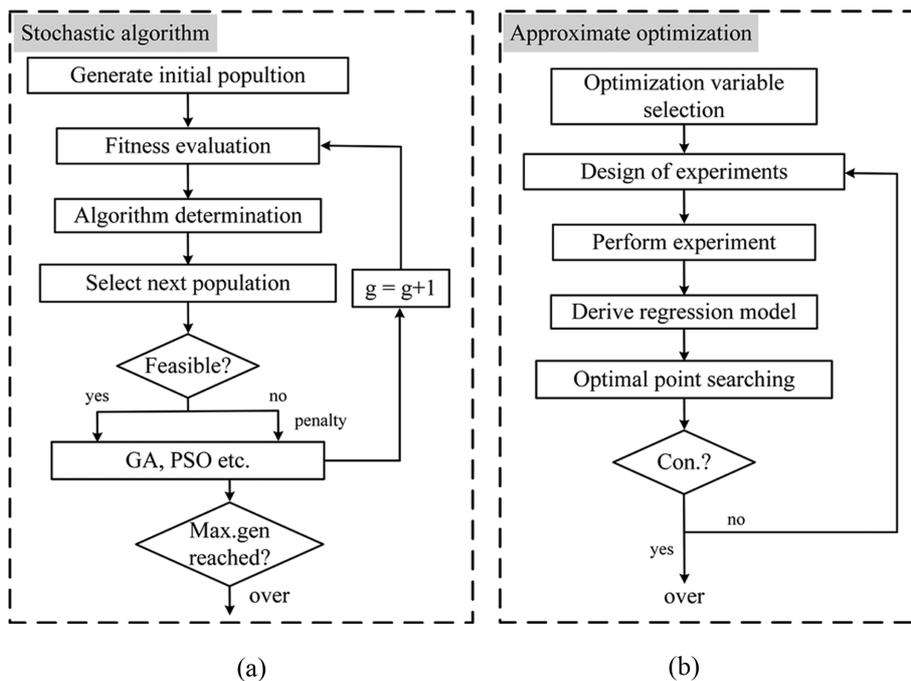


Fig. 12. General optimization flowchart: (a) stochastic algorithm, (b) approximate Optimization Techniques.

것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 산업통상자원부(MOTIE)와 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20183010025420).

References

- [1] Blaabjerg F, chenZ., USA: Morgan and Claypool (2006).
- [2] M. Cheng and Y. Zhu, *Energy Conversion and Management*, (2014).
- [3] N. S. Patil and Y. N. Bhosle, *Energy and Control (ICPEC)* (2013).
- [4] B. Guo, J. Park, C. Choi, and E. Jo, *J. Magn.* **23**, 1 (2018).
- [5] R. Yang, N. Schofield, and A. Emadi, 2016 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) (2016).
- [6] J. Dong, Y. Huang, L. Jin, and H. Lin, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* **26**, 4 (2016).
- [7] W. Q. Chu and Z. Q. Zhu, 6th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2012) (2012).
- [8] W. Zhu, Z. Yu, Y. Ni, J. Shi, and G. Li, 2017 IEEE International Conference on Unmanned Systems (ICUS) (2017).
- [9] B. Kim, I. Paek, S. Song, J. Choi, Y. Huh, and S. Kim, Technical Report, KangWon National University, Korea (2020).
- [10] S. Ha and S. Choi, Technical Report, Commercializations Promotion Agency for R&D Outcomes, Korea (2018).
- [11] www.vestas.com.
- [12] www.ge.com.
- [13] www.en.wind-turbine-models.com.
- [14] www.siemensgamesa.com.
- [15] www.energy.siemens.com.
- [16] www.stxhi.co.kr.
- [17] www.goldwindglobal.com.
- [18] www.rls.si.
- [19] B. S. Zechihin, R. Y. Misyutin, S. V. Zhuravlev, and K. Y. Korenchuk, 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS) (2019).
- [20] O. Kudrjavtsev, A. Kilk, and T. Vaimann, 2016 Electric Power Quality and Supply Reliability (PQ) (2016).
- [21] D. Mazur, 2013 International Symposium on Electrodynamical and Mechatronic Systems (SELM) (2013).
- [22] X. Fan, R. Qu, B. Zhang, and J. Li, 2015 18th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS) (2015).
- [23] A. Zaini, N. Niguchi, and K. Hirata, 2014 International Conference on Electrical Machines (ICEM) (2014).
- [24] A. B. Kjaer, S. Korsgaard, S. S. Nielsen, L. Demsa, and P. O. Rasmussen, *IEEE Transactions on Energy Conversion* **35**, 1 (2020).
- [25] Liu, Cheng-Tsung, Hung, Kuo-Yuan, Hwang, C.C, *IEEE Trans. Magn.* (2016).
- [26] M. S. Shehu, M. Norhisam, M. Lutfi, N. Mariun, and T. Hanamoto, 2016 IEEE International Conference on Power and Energy (PECon) (2016).
- [27] M. Lin, L. Hao, X. Li, X. Zhao, and Z. Q. Zhu, *IEEE Trans. Magn.* **47**, 10 (2011).
- [28] H. Chen, S. Zhao, H. Wang, and R. Nie, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity*, **30**, 4 (2020).
- [29] M. A. Patel and S. C. Vora, *IEEE Trans. Magn.* **53**, 11 (2017).
- [30] L. Hao, M. Lin, X. Zhao, X. Fu, Z. Q. Zhu, and P. Jin, *IEEE Trans. Magn.* **48**, 11 (2012).
- [31] G. Shrestha, H. Polinder, D. Bang, and J. A. Ferreira, *IEEE Trans. Energy Conversion* **25**, 3 (2010).
- [32] B. Kim, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **55**, 5 (2019).
- [33] A. R. Pramurti and O. Y. Hutajulu, 2018 Electrical Power, Electronics, Communications, Controls and Informatics Seminar (EECCIS) (2018).
- [34] S. Jang, H. Park, J. Choi, C. Han, and M. Choi, *IEEE Trans. Magn.* **49**, 7 (2013).
- [35] A. Di Gerlando, G. Foglia, M. F. Iacchetti, and R. Perini, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **58**, 9 (2011).
- [36] A. Mrad, Z. Noun, and M. Arnaout, 2018 International Conference on Computer and Applications (ICCA) (2018).
- [37] G. Harb, M. Arnaout, L. Hatab, and M. Ramadan, 2017 29th International Conference on Microelectronics (ICM) (2017).
- [38] K. Shin, H. Park, H. Cho, and J. Choi, *AIP Adv.* **7**, 5 (2017).
- [39] C. He and T. Wu, *IEEE Trans. Electrical Machines and Systems* **3**, 1 (2019).
- [40] A. Hanic, D. Zarko, D. Kuhinek, and Z. Hanic, *IEEE Trans. Energy Conv.* **33**, 3 (2018).
- [41] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, *IEEE Trans. Magn.* **47**, 2 (2011).
- [42] W. Tong, R. Sun, C. Zhang, S. Wu, and R. Tang, *IEEE Trans. Magn.* **55**, 6 (2019).
- [43] S. Alshibani, 2018 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA),(2018).
- [44] Q. Wang, S. Niu, and L. Yang, in *IEEE Trans. Magn.* **54**, 3 (2018).
- [45] J. H. J. Potgieter and M. J. Kamper, *IEEE Trans. Ind. Appl.* **51**, 4 (2015).
- [46] S. A. Mirnikjoo, K. Abbaszadeh, and S. E. Abdollahi, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **68**, 8 (2021).
- [47] T. de Paula Machado Bazzo, J. F. Kölzer, R. Carlson, F. Wurtz, and L. Gerbaud, *IEEE Trans. Ind. Electron.* **64**, 12 (2017).
- [48] C. L. Sabioni, M. F. O. Ribeiro, and J. A. Vasconcelos, *IEEE Trans. Magn.* **54**, 3 (2018).
- [49] X. Zhao, S. Niu, and W. Fu, *IEEE Trans. Magn.* **56**, 1 (2020).
- [50] S. Lee, Y. Kim, K. Lee, and S. Kim, *IEEE Trans. Appl. Superconductivity* **26**, 4 (2016).