

풍력발전기의 경년화를 고려한 자동튜닝 알고리즘 개발

Development of auto-tuning algorithm for considering aging effect of wind turbine generator

김세윤*·김성호**†

Se-Yoon Kim and Sung-Ho Kim†

*군산대학교 전자정보공학부

**군산대학교 제어로봇공학과

요 약

최근 전 세계적으로 화석에너지와 관련된 기후변화 및 국제 정세로 인해 풍력발전에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적으로 풍력발전 시스템은 설치 후 약 20년간의 사용연한을 갖도록 설계되며 따라서 장기간 운전할 경우, 경년화로 인한 발전 성능의 저하가 필연적으로 발생된다. 본 논문에서는 풍력발전기의 경년화와 관련된 성능 저하의 문제를 해결하기 위한 새로운 형태의 자동 튜닝 기법을 제안하고자 한다. 또한 제안된 기법의 유용성을 확인을 위해 다양한 형태의 시뮬레이션 고찰을 수행하였다.

키워드 : 풍력발전기, 경년화, 발전 성능 저하, 최대 전력점 추종, 자동 튜닝

Abstract

Recently, concern over climate change and global politics associated with traditional fossil fuel energy sources has driven significant increase in wind energy utilization over the past decade around world. Generally, life-time of wind turbine system should be guaranteed for twenty years. Therefore, performance deterioration of wind turbine system occurs owing to aging effects for long term operation. In this work, a new type of auto tuning algorithm for overcoming the problem of performance deterioration is proposed. Furthermore, various simulations are carried out to verify the feasibility of the proposed scheme.

Key Words : Wind turbine, Aging Effect, Performance Deterioration, MPPT, Auto Tuning

1. 서 론

최근 화석에너지의 고갈에 대비한 친환경적인 대체 에너지원으로 풍력발전이 주목을 받고 있다. 독일, 네덜란드 및 덴마크를 중심으로 서유럽 여러 나라에서는 1970년대부터 풍력발전에 대한 많은 연구가 있어 왔고, 그 결과 최근에는 수 MW급 풍력발전 시스템을 상용화하기에 이르렀다. 국내에서도 다수의 연구기관을 중심으로 풍력발전 시스템의 국산화 연구개발이 활발히 진행되고 있으며 또한 정부 지원의 지역 에너지 사업을 통해 제주도 등 다수의 지역에 중대형 국내외 시스템이 도입되어 설치 운전되면서 국내 풍력 자원 개발의 가능성을 검토하고 있는 실정이다[1].

최근 국내에서는 10kW급 이하의 소형 풍력발전 시스템에 대한 관심이 높아지고 있어 풍력가로등, 태양광

하이브리드 풍력 발전기 등 다양한 형태의 어플리케이션 이 개발되고 있다.

소형 풍력발전 시스템은 수평 또는 수직축 블레이드, 3상 영구자석형 동기발전기, DC-DC 컨버터 및 계통 연계형 인버터로 구성되며 시동풍속(cut-in wind speed)에서 정격풍속(rated wind speed)사이에서는 바람 에너지로부터 최대의 전력인출을 위한 MPPT(Maximum Power Point Tracking)알고리즘이 사용되고 있다. 소형 풍력발전 시스템에 적용가능한 MPPT 알고리즘은 태양광발전에도 사용되고 있으며 P&O(Perturbation & Observation), IC(Incremental Conductance) 및 Hill climbing 기법 등이 있다[2-4]. 이들 기법 대부분은 DC-DC 컨버터의 전압 및 전류의 측정을 통해 최대 전력인출을 가능케 하는 듀티비를 자동으로 찾아가는 방법으로 발전기 및 컨버터의 파라미터 변화에 상관없이 항상 최대의 전력인출을 가능케 한다는 장점을 갖으나 인버터 등에서 발생하는 노이즈 성분이 클 경우 최적의 듀티비를 찾는 것이 어렵게 된다는 문제점을 갖게 된다. 이러한 문제로 인해 현재 소형 풍력발전 시스템의 MPPT 제어에는 노이즈에 강인한 특성을 갖는 레퍼런스 전력을 입력으로 갖는 PI 제어가 일반적으로 사용되고 있다[5].

접수일자: 2012년 1월 26일

심사(수정)일자: 2012년 4월 6일

게재확정일자 : 2012년 4월 9일

† 교신저자

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신 인력양성 사업으로 수행된 연구 결과임.

일반적으로 소형 풍력발전시스템의 사용연한은 10년 이상이다. 따라서 소형풍력발전 시스템의 최대 전력점 추종을 위해 레퍼런스 전력기반의 PI 제어를 사용할 경우, 발전기 및 전력변환장치의 경년화를 고려치 않고 초기에 설치된 값을 기반으로 운전하게 된다면 시간이 지남에 따라 최적의 성능을 얻는 것이 불가능하게 된다.

이에 본 연구에서는 3상 동기발전기와 DC-DC 컨버터의 경년화로 인해 발생하는 특성 변화를 검출하고 자동으로 레퍼런스 전력을 조정할 수 있는 기법을 제안하고 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 유용성을 확인하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 소형 풍력발전시스템의 구성요소인 블레이드, 3상 영구자석 동기발전기, 이와 결합된 브릿지 다이오드 모듈 및 DC-DC 변환기의 특성에 대해 고찰하며, 3장에서는 경년화를 고려한 자동 레퍼런스 전력 발생 메커니즘에 대해 기술하고자 한다. 또한 4장에서는 제안된 기법의 유용성 확인을 위한 시뮬레이션을 수행하고자 하며 5장에서 결론에 대해 기술하고자 한다.

2. 소형 풍력발전 시스템

2.1 터빈 블레이드의 특성

바람 에너지로부터 터빈 블레이드가 흡수하는 에너지는 식(1)과 같이 표현되며

$$P_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V_{wind}^3 C_p(\lambda, \beta) \quad [W] \quad (1)$$

여기서 R 는 회전자의 반경[m], ρ 는 공기의 밀도로 약 $1.25 [Kg/m^3]$ 이다.

식(1)에서 전력계수 $C_p(\lambda, \beta)$ 는 풍속 V_{wind} 의 바람이 갖고 있는 에너지 중에서 블레이드가 받아들이는 에너지의 비율을 의미한다. 여기서 λ 는 풍속에 대한 블레이드의 회전 속도와의 비(주속비: Tip Speed Ratio)로 식(2)와 같이 정의된다.

$$\lambda = \frac{\omega_r R}{V_{wind}} \quad (2)$$

일반적으로 소형 풍력발전 시스템의 경우에는 고정 피치를 사용하며 따라서 주속비의 변화에 대한 전력계수를 나타내면 그림 1과 같다.

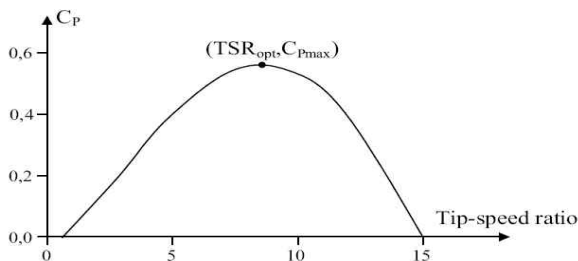


그림 1. 주속비 변화에 따른 전력 계수
Fig. 1. Power coefficient vs. tip-speed ratio(TSR)

그림 1로부터 터빈이 회전을 개시하여 주속비가 점점 커지면 출력계수, 즉 효율이 증가하다가 어느 속도 이상으로 회전하게 되면 효율이 오히려 떨어짐을 알 수 있다. 이러한 출력 계수는 블레이드 설계시 결정되며 Betz의 연구결과에 따르면 이론적 최대값이 0.593임이 알려져 있다.

그림 1과 같은 주속비 대 전력변환효율 곡선이 주어지면 그림 2와 같은 풍속의 변화에 따른 터빈 블레이드의 회전속도 대 전력 그래프를 구하는 것이 가능하다. 그림 2의 적색 점선은 각 풍속에서 얻을 수 있는 최대 전력을 의미한다.

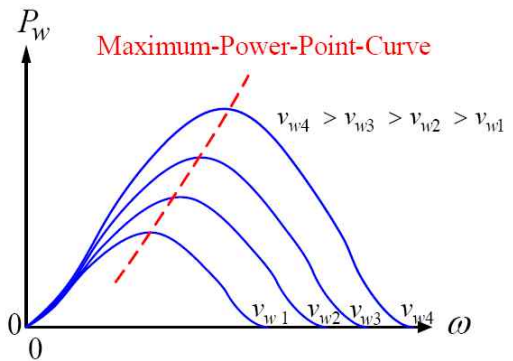


그림 2. 풍속의 변화에 대한 회전속도 대 출력 특성

Fig. 2. Characteristics of turbine power vs. blade rotation speed corresponding to various wind speeds

2.2 정류기가 포함된 PMSG와 DC-DC 변환기의 특성

소형 풍력발전 시스템의 발전기로는 PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator)가 널리 사용되고 있으며 전력 변환의 용이성 확보를 위해 3상 출력단에 3상 브릿지 다이오드 모듈을 내장시킨 PMSG가 일반적으로 사용되고 있다.

PMSG와 3상 브릿지 다이오드 모듈이 내장된 발전기의 Matlab 시뮬링크 블록을 나타내면 그림 3과 같다.

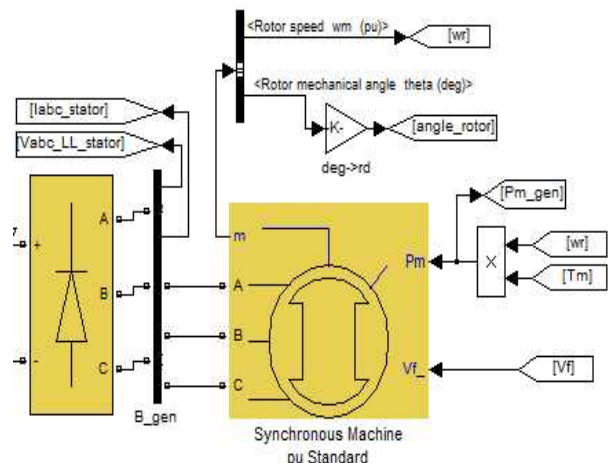


그림 3. 브릿지 다이오드 내장 PMSG
Fig. 3. PMSG with bridge diode module

풍속이 증가하여 터빈 블레이드의 회전 속도가 증가함에 따라 브릿지 다이오드가 내장된 PMSG의 출력 특성을 살펴보면 그림 4와 같다.

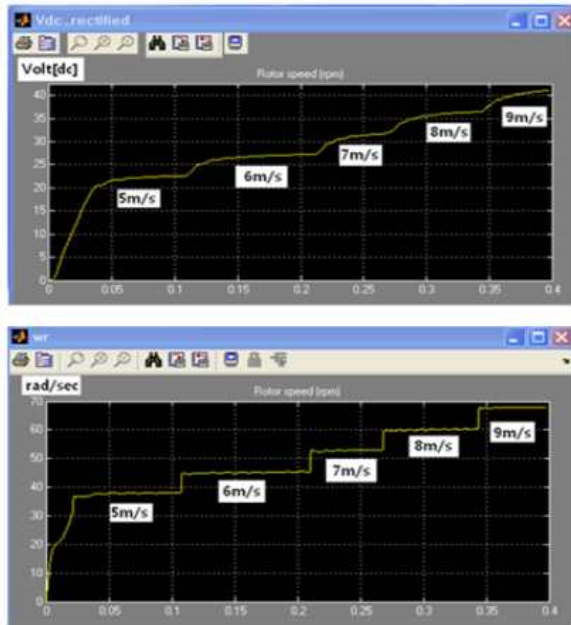


그림 4. 풍속의 증가에 따른 브릿지 다이오드 모듈을 포함한 PMSG의 출력 전압 특성

Fig. 4. output voltage characteristics of PMSG with bridge diode module according to the change of wind speed

그림 4로부터 풍속이 증가함에 따라 브릿지 다이오드 모듈을 갖는 PMSG의 직류 전압은 상승함을 알 수 있다.

2.3 최대 전력점 추종 알고리즘

소형 풍력발전 시스템은 풍속에 따라 다음과 같은 모드로 운전된다.

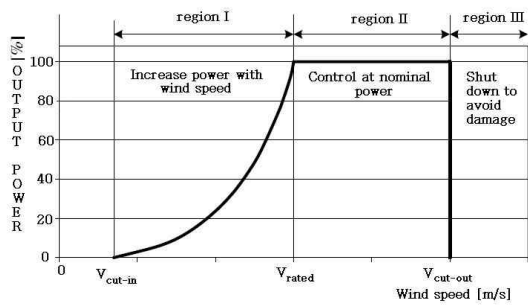


그림 5. 소형 풍력발전 시스템의 운전 모드
Fig. 5. Operating mode of small wind power system

가변속 운전이 가능한 소형 풍력발전 시스템의 운전 모드는 그림 5에서와 같이 발전이 시작되는 컷인 풍속 (cut-in speed)과 정격풍속 사이에서는 최대 전력점 추종 알고리즘이 적용되며, 정격 풍속 이상에서는 강제로 dump 저항에 전류를 흘려 발전기를 일정 속도로 유

지시키며 정격 풍속 이상의 풍속에서는 발전기의 단자를 단락시켜 운전을 중지시킨다.

cut-in 풍속과 정격 풍속 사이에서의 운전은 소형 풍력발전 시스템의 발전 성능에 큰 영향을 미치며 이를 위해 다양한 형태의 MPPT 알고리즘이 도입되고 있다. 가장 일반적으로 사용되고 있는 PI 제어 기반의 MPPT 알고리즘에 대해 설명하면 다음과 같다[7-9].

2.4 레퍼런스 전력 기반의 PI 제어기

PMSG와 3상 브릿지 다이오드 및 DC-DC 변환기로 구성된 풍력발전 시스템에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 MPPT를 위한 PI 제어기 블럭도를 나타내면 그림 6과 같다.

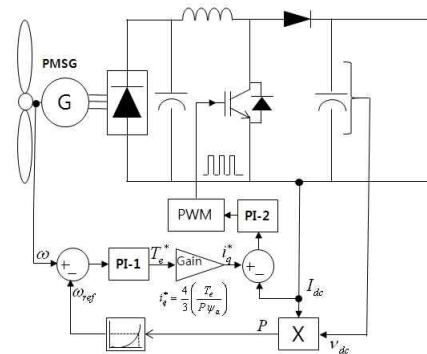


그림 6. MPPT를 위한 PI 제어기
Fig. 6. PI controller configuration for MPPT

그림 6에서와 같이 풍속의 변화에 따라 최대 전력의 인출을 위해서는 DC-DC 변환기의 PWM 듀티비를 조절해야 하며 이를 위해 두 개의 PI 제어기(PI-1, PI-2)가 사용되고 있다. 이중 PI-1 제어기는 기준입력 w_{ref} 와 블레이드 회전속도 w 를 받아들여 이들 간의 오차를 제어기 입력으로 사용한다. PI-1 제어기의 기준입력 w_{ref} 는 그림 6에서와 같이 룩업 테이블 형태로 표현되는 회전속도 대 전력곡선으로부터 구해진다. PI-1 제어기의 출력은 MPPT를 위한 레퍼런스 토크 역할을 하며, 식(3)과 같이 표현되는 PMSG의 토크(T_e)와 전류(i_q)와의 관계식으로부터

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \psi_a i_q \tag{3}$$

기준 전류 i_q^* 의 값을 구할 수 있다. 또한 PI-2는 i_q^* 를 기준 전류로 그리고 DC-DC 변환기의 출력전류 I_{dc} 를 제환 신호로 사용하여 MPPT를 위한 DC-DC 변환기의 PWM 듀티비를 조절하게 된다.

3. 소형 풍력발전기의 경년화를 고려한 자동 레퍼런스 전력 발생 메커니즘

현재 생산·판매되고 있는 소형 풍력발전기의 대부분은 cut-in 풍속에서 정격 풍속 사이에서 풍속에서 최

대의 전력인출을 위해 그림 7과 같이 레퍼런스 전력 기반의 PI 제어를 사용하고 있다. PI 제어기의 기준 입력으로 사용되는 레퍼런스 전력은 풍력발전기 설치 초기에 결정되며 이의 결정 과정은 다음과 같다.

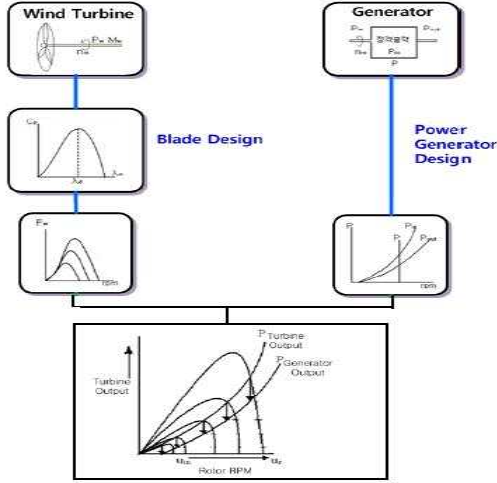


그림 7. 레퍼런스 전력 취득 메커니즘

Fig. 7. Reference power generation mechanism

그림 7의 좌측은 블레이드 설계로부터 얻어지는 회전수대 전력 곡선 취득과정을 나타내며 우측은 블레이드와 연결된 발전기의 회전수대 전력 특성곡선을 나타낸다. 그림으로부터 블레이드와 발전기를 함께 고려할 경우 최대 전력점은 블레이드만을 고려했을 경우보다 낮은 쪽에 위치함을 알 수 있다. 이는 발전기의 전력 변환 손실에 기인한 것으로 이들 데이터는 그림 6의 MPPT제어의 레퍼런스로 사용된다.

일반적으로 소형풍력발전기는 설치후 10년이상 운전되어야 하며 따라서 시간이 지남에 따라 블레이드 및 발전기의 특성은 초기 설치시와는 다르게 된다[7-8]. 임의의 소형 풍력발전기에 대한 초기 설치시의 풍속의 변화에 따른 회전수대 전력량 및 최대 전력점을 나타내면 그림 8과 같다.

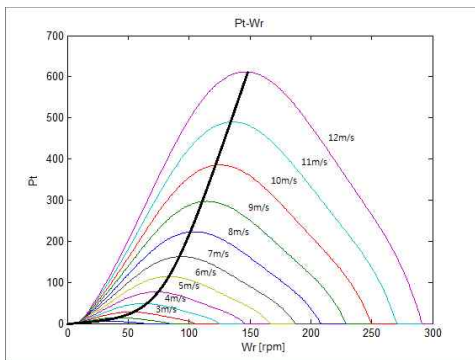


그림 8. 블레이드와 발전기가 결합된 시스템의 풍속에 따른 회전수대 전력량 그래프

Fig. 8. RPM vs. power graph for various wind speeds

시간이 지나 블레이드 및 발전기의 특성이 변화한 경우의 회전수대 전력량 그래프를 나타내면 그림 9와 같이 특성곡선의 형태 및 최대 전력점의 위치가 변하게 된다.

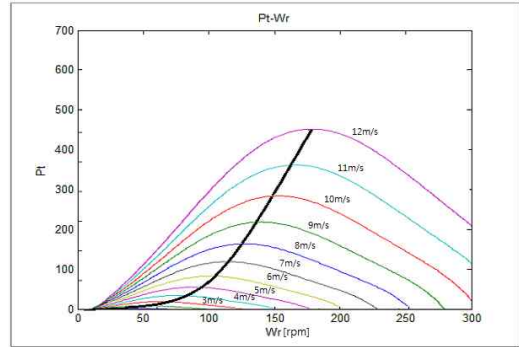


그림 9. 블레이드와 발전기가 결합된 시스템의 풍속에 따른 회전수대 전력량 그래프

Fig. 9. RPM vs. power graph for various wind speeds

본 절에서는 소형 풍력발전기의 경년화로 인해 발생하는 레퍼런스 전력의 변화를 자동으로 감지하여 PI 제어기에 사용되는 레퍼런스 전력 곡선을 자동으로 조정할 수 있는 기법을 제안하고자 한다.

일반적으로 경년화로 인해 발전기 및 전력소자의 파라미터가 변하게 되면 초기에 설정된 레퍼런스 전력 곡선을 기반으로 하는 MPPT 제어는 제대로 동작하지 않게 된다. 따라서 본 연구에서는 블레이드의 회전속도와 이에 따른 발생전력을 매순간 버퍼에 저장하고 해당 블레이드의 회전속도에서 버퍼에 저장된 데이터들로부터의 최대값을 찾아낸 후 이를 새로이 정의되는 레퍼런스 전력곡선으로 사용하고자 하였다. 제안된 자동 튜닝 알고리즘을 나타내면 그림 10과 같다.

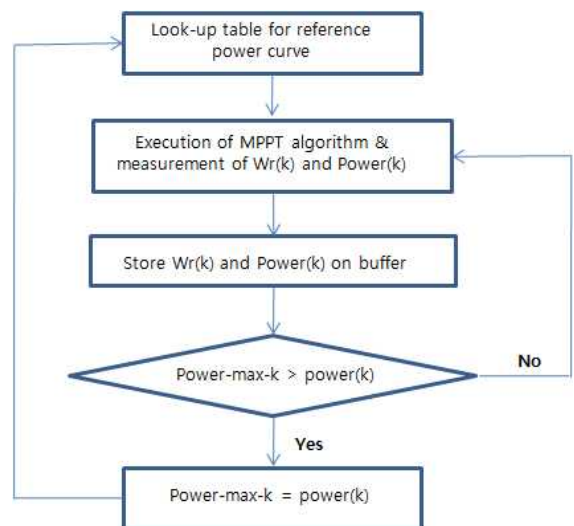


그림 10. 자동 튜닝 알고리즘에 대한 플로우차트

Fig. 10. Flow chart for auto-tuning algorithm

그림 10에서 $Power(k)$ 와 $Wr(k)$ 는 k -스텝에서 측정된 전력과 회전수를 나타내며 $Power-max-k$ 는 회전속도가 $Wr(k)$ 일 때의 최대 전력값을 의미한다. 초기 $Power-max-k$ 는 설치시 결정된 레퍼런스 전력이며 현재 측정된 $Power(k)$ 의 값이 이 값보다 작다면 설정된 레퍼런스 전력 곡선에 의해 MPPT가 수행되며 만일 경년화로 인해 측정된 $Power(k)$ 값이 저장된 값보다 작게 된다면 $Power-max-k$ 을 새로운 값으로 변경하게 된다. 이와 같은 과정을 통해 실시간으로 변경된 레퍼런스 전력 곡선은 PI제어기의 기준 입력으로 사용된다. 일반적으로 경년화가 진행되면 같은 회전수에 대해 출력되는 전력이 저하하게 되므로 상기와 같은 자동 튜닝 메커니즘은 타당하다고 판단된다.

4. 시뮬레이션 고찰

본 연구에서는 제안된 자동 튜닝 기법의 유용성 확인을 위해 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 사용된 PMSG의 제원은 표 1과 같다.

표 1. PMSG 제원

Table 1. Specifications of PMSG

항 목	용 량
Stator phase resistance R_s (ohm)	1.6
Inductances [L_d (H) L_q (H)]	0.006365 0.006365
Flux magnets (V,s)	0.1852
Voltage Constant (V_{peak} L-L/krpm)	67.1831
Torque Constant (N,m / A_peak)	0.5556

소형 풍력발전시스템의 최대 전력점 추종 특성의 고찰을 위해 구현된 시뮬링크 블록을 나타내면 그림 11과 같다.

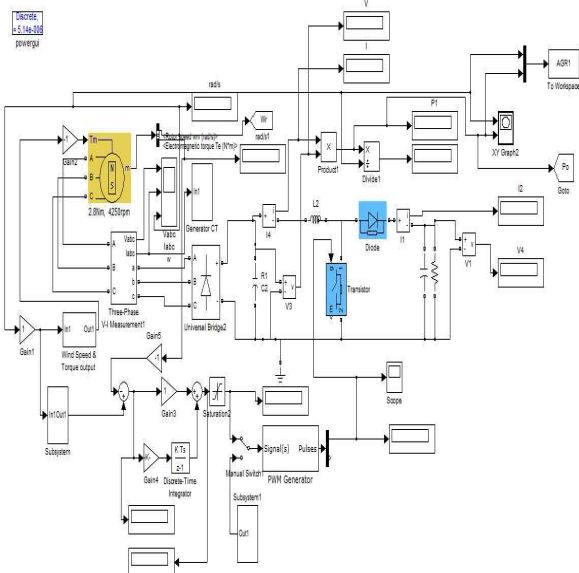


그림 11. 시뮬레이션을 위한 시뮬링크 블록도
Fig. 11. Simulink block diagram for simulation

경년화가 진행되기 전의 최대전력점 추종알고리즘의 응답 특성을 나타내면 그림 12와 같다.

그림 12로부터 경년화가 진행되기 전의 최대전력점 추종알고리즘은 풍속의 변화시에 규정된 레퍼런스 전력 곡선을 잘 추종함을 알 수 있다.

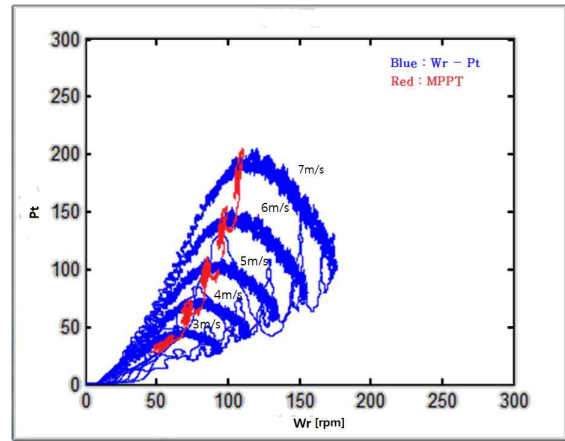


그림 12. 경년화가 진행되기 전의 최대 전력점 추종 특성

Fig. 12. Characteristic of MPPT before aging effects

발전기의 경년화로 인해 기존의 권선 저항의 값이 1.6 [ohm]에서 4[ohm]으로 변경되었을 때의 풍속변화에 따른 회전수대 전력량 그래프 및 초기에 설정된 레퍼런스 전력값을 이용하여 MPPT를 수행하였을 경우의 응답특성을 나타내면 그림 13과 같다.

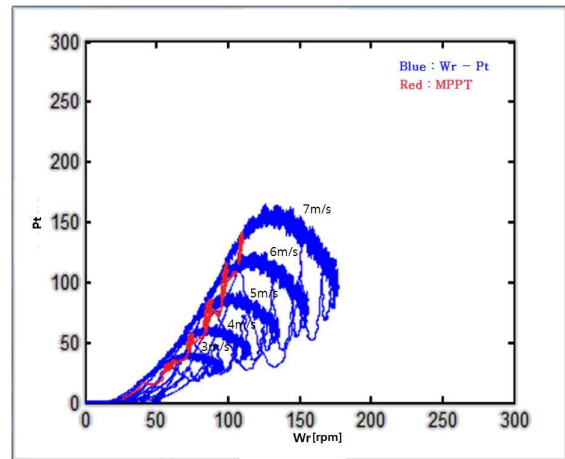


그림 13. 경년화로 인해 변화된 Pt-Wr 곡선 및 MPPT 응답 특성

Fig. 13. Pt-Wr curve and MPPT characteristics altered by aging effects

그림 13으로부터 경년화가 진행되었을 경우 초기에 설정된 레퍼런스 전력 곡선을 사용한다면 MPPT의 성능이 저하됨을 알 수 있다. 경년화와 관련된 최대출력점 추종특성을 향상시키기 위해 본 연구에서 제안된 자

동 튜닝기법을 적용한 경우의 응답특성을 나타내면 그림 14와 같으며 자동 튜닝 기법에 의해 구해진 레퍼런스 전력 곡선을 나타내면 그림 15와 같다.

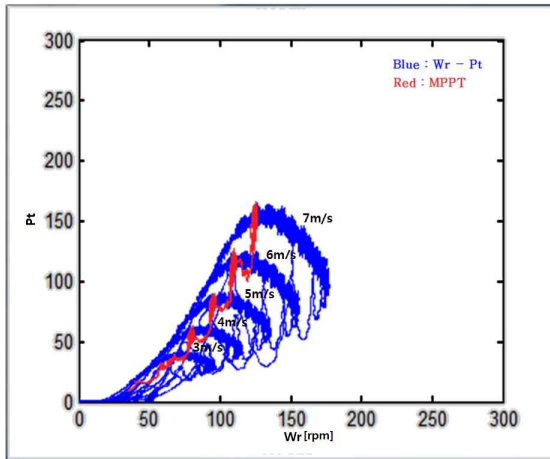


그림 14. 자동 튜닝된 전력 레퍼런스 곡선을 사용한 최대 전력점 추종 알고리즘의 응답 특성

Fig. 14. Response characteristic of maximum power point tracking algorithm with auto-tuned reference power curve

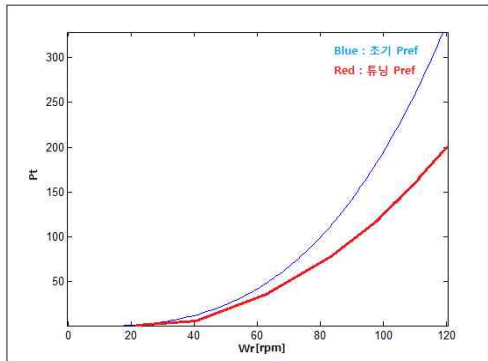


그림 15. 자동 튜닝된 레퍼런스 전력 곡선
Fig. 15. Auto-tuned power reference curve

그림 14로부터 알 수 있듯이 실시간 운전을 통해 튜닝된 레퍼런스 전력 곡선을 PI 제어기에 사용하면 경년화에 따른 운전 상태의 변화에도 불구하고 효율적인 최대 전력점 추종이 이루어짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 소형풍력발전 시스템의 최대 전력점 추종에 널리 사용되고 있는 레퍼런스 전력기반의 PI 제어를 위해 시간에 따른 경년화에도 일정한 제어성능의 유지를 가능케 하는 레퍼런스 전력 자동 튜닝 알고리즘을 제안하였으며 제안된 기법의 유용성확인을 위한 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 소형풍력발전 시스템의 발전 성능에 큰 영향을 미치는 3상 영구 자석

형 동기발전기의 권선 저항의 변화에도 효과적인 레퍼런스 전력곡선의 자동 튜닝 및 이를 기반으로 하는 최대 전력점 추종이 수행됨을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] 테이코산업연구소, “녹색성장을 위한 풍력산업 실태와 전망”, *진한열앤비*, 2009
- [2] Y.C. Kuo, T.J. Liang, “Novel Maximum-power-point-tracking controller for photovoltaic energy conversion system,” *IEEE Trans. on Industrial Electronics*, vol.48, pp.594-601, 2011.
- [3] V. Salas, E. Olias, “Review of the maximum power point tracking algorithms for stand-alone photovoltaic systems”, *Elsevier*, 2005
- [4] W. Xiaa and W.G. Dunford, ‘A modified adaptive hill climbing method for photovoltaic power systems’. in *fmc. IEEE 35th PESC*. vol. 3, pp.1957-1963, June 2004
- [5] 정해상, “소형 풍력발전기 설계와 제작”, *일진사*, 2011
- [6] X. Zhang, S. He, P. Zho and W. Wang, “Summarization and study of fault diagnosis technology of the main components of wind turbine generator system”, *IEEE Sustainable Energy Technologies*, pp.1223-1226, 2008.
- [7] Z. Salameh, D. Taylor, “Step-up maximum power point tracker for photovoltaic arrays,” *Solar Energy Proc.*, vol.44, no.1, pp.57-61, 1990.
- [8] J. H. R. Enslin, D. B. Snyman, “Simplified feed-forward control of the maximum power point in PV installations,” in *Conf. Rec. IEEE Industrial Electronics Conf.*, pp.542-547, 1992.
- [9] V. Arcidiacono, S. Corsi, L. Lambri, “Maximum power point tracker for photovoltaic power plants,” in *Conf. Rec. IEEE Photovoltaic Specialists Conf.*, pp. 507-512, 1982.

저 자 소 개



김세윤(Kim se-yoon)

2008년 : 군산대학교 전자정보공학부
학사졸업

2011년~현재 : 동 대학원 전자정보공학부
석사과정

관심분야 : 풍력발전, 인공지능경망, 자동
제어, 소프트웨어 설계 및 개발

Phone : 018-278-0053

Fax : 063-468-6224

E-mail : ksydiary@kunsan.ac.kr



김성호(Kim Sung-ho)

1984년 : 고려대학교 공과대학 학사졸업

1986년 : 고려대학교 대학원 석사졸업

1991년 : 고려대학교 대학원 박사졸업

1988년~1990년 : 고려대 생산기술연구소
연구원

1995년~1996년 : JAPAN HIROSHIMA
UNIVERSITY POST-DOC.

1991년~ 현재 : 군산대학교 제어로봇공학과 교수

관심분야 : 풍력발전, 뉴럴 네트워크, 퍼지, 센서 네트워크,
공장 자동화 및 고장진단

Phone : 010-2610-1224

Fax : 063-468-6224

E-mail : shkim@kunsan.ac.kr