

풍력용 동기발전기의 전기자 반작용을 이용한 전기 제동방식에 관한 연구

박귀열*, 문채주**, 정의현***, 장영학****, 김의선*****

*목포대학교 대학원 전기공학과(wowsuper@nate.com)

**목포대학교 전기공학과(cjmoon@mokpo.ac.kr)

***목포대학교 전기공학과(swat9310@paran.com)

****목포대학교 제어시스템공학과(yhchang@mokpo.ac.kr)

*****신경대학교 인터넷정보통신학과(eskim@sgu.ac.kr)

A study on electronic braking system using wind power synchronous generator's armature reaction

Park, Gui-Yeol* Moon, Chae-Joo** Cheang, Eui-Heang*** Kim, Eui-Sun***

*Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(wowsuper@nate.com)

**Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(cjmoon@mokpo.ac.kr)

***Dept. of Electrical Engineering, Mokpo National University(swat9310@paran.com)

****Dept. of Control System Engineering, Mokpo National University(yhchang@mokpo.ac.kr)

*****Dept. of Information & communication Engineering, Shin Gyeong University(eskim@sgu.ac.kr)

Abstract

The mechanical parts of small wind power generator less than 10 kW are manufactured in the form of removing most of the accelerators. The braking system to protect blade from damages caused by high wind speed is manufactured in a manner having apparatus system(furling), manual brake or no brake.

This study is on braking system in small size wind power generator, and carried out survey as following steps by applying electric braking system which uses armature reaction.

We explained the principle of electric braking system and the principle of existing braking system.

Also, this paper interpreted short circuit current through open circuit and short circuit, as well as checking brake system's action using armature reaction with real construction of control device.

Keywords : 소형풍력발전(Small wind turbine), 제동방식(Braking system), 전기자반작용(Armature reaction)

기 호 설 명

$V_{OC,phase}$ [V]	: 개방회로의 선간전압
I_{SC} [A]	: 선전류의 평균치
$i(t)$ [A]	: 단락전류의 순시치
$I_{s,s}$ [A]	: 전류의 실효치
w [rad/s]	: 각 주파수
Z_s [Ω]	: 동기 임피던스
R_s [Ω]	: 한 상의 저항
X_s [Ω]	: 한 상의 동기 리액턴스

1. 서 론

정부는 ‘저탄소 녹색성장(green growth)’을 국가발전전략으로 천명하고, 기후변화와 청정 기술을 성장 동력으로 활용하고자 국가적 역량을 결집하고 있다.

실천사항으로 신재생에너지 9대 분야를 중점 육성하며, 먼저 세계시장이 급성장하고 국내 연관 산업이 발달한 태양광, 풍력 등 4개 분야를 우선 성장 동력화 하는 내용을 발표하였다.

풍력발전은 발전단가가 비교적 저렴하나 소요면적이 작아 국내 보급이 2006년 이후 연평균 20%씩 급증하여 2030년에는 신재생에너지원의 13%를 차지하는 우리나라 핵심 에너지산업으로 성장할 것으로 전망하고 있다.¹⁾

풍력발전은 바람이 지니고 있는 에너지를 우리가 유용하게 사용할 수 있는 전기에너지로 바꿔주는 시스템이다.

일반적인 풍력발전 시스템의 구성은 기계장치부, 전기장치부, 제어장치부로 구성된다.

기계장치부는 바람으로부터 회전력을 생산하는 회전날개(Blade), 회전축(Shaft)를 포함한 회전자(Rotor), 이를 적정 속도로 변환하는 증속기(Gearbox)와 기동·제동 및 운용 효율성 향상을 위한 브레이크, 피치와 요시스템 등의 제어장치부분으로 구성된다.

제어장치부는 풍력발전기가 무인 운전이 가능하도록 설정하는 제어시스템 및 요와 피치 제어기, 원격지 제어 및 지상에서 시스템 상

태를 확인할 수 있게 하는 모니터링 시스템으로 구성 된다.

10[kW]이하 소형풍력발전의 기계장치부는 대부분 증속기가 없는 구조로 제작된다. 고풍속에서 블레이드의 파손을 방지하기 위한 제동시스템은 기구적 시스템, 수동 브레이크, 구속제어방식 또는 브레이크가 없는 무제동의 형태로 제작되고 있다.

위와 같은 제동방식은 대부분 기계적인 제동시스템으로 회전축과 타워에 피로하중을 높이고 유지 보수가 어렵다는 단점이 있다.

또한 구속제어방식은 대부분 릴레이를 사용하므로 아크가 발생한다. 따라서 제어부의 수명이 단축되며 큰 전력을 소비할 수 있어야 하므로 단가가 상승한다.

본 연구에서는 소형풍력발전에서의 제동시스템에 관한 연구로 기존의 제동방식의 단점을 보완하고자 전기자 반작용을 이용한 전기식 제동방식을 적용하였다.

본 연구에서는 기존의 제동시스템과 전기식 제동시스템의 제동원리를 설명하였고 개방회로 및 단락회로를 통한 단락전류를 해석하고 실제 제어장치를 구성하여 전기자 반작용을 이용한 제동시스템의 동작을 확인하였다.

2. 기존의 제동 시스템

2.1 기구적 시스템

기구적 시스템(furling)은 고풍속시 회전축과 블레이드가 이루는 각도를 90도로 접는 방식과, 무게 중심을 뒤쪽으로 두어 풍력발전기가 뒤로 젖혀지게 하는 방식이 있다.

2.2 수동 브레이크

수동 브레이크는 브레이크 페드를 장치하는 방식이다.

2.3 구속제어방식

구속 제어 방식은 풍력발전기의 정격 용량

을 초과하는 풍속에서 저저항의 덤프하중이나 인덕터를 통해 발생 전력을 소비하고 속도를 감속 시키는 방식이다.

위와 같은 제동방식은 대부분 기계적인 제동시스템으로 회전축과 타워에 피로하중을 높이고 유지 보수가 어렵다는 단점이 있다.

또한 구속제어방식은 대부분 릴레이를 사용하므로 아크가 발생한다. 따라서 제어부의 수명이 단축되며 큰 전력을 소비할 수 있어야 하므로 단가가 상승한다.

3. 전기식 제동 방식

제안된 제동방식은 3상 동기발전기의 단락시 발생하는 단락전류에 의한 전기자 반작용을 이용하는 것으로 단락시 발생하는 전기자 자속과 계자자속의 인력을 제동력으로 이용하는 것이다. 구속제어방식과 유사하게 큰 부하를 사용하여 속도를 제한하는 방식이나 별도의 덤프하중이나 인덕터를 사용하지 않으므로 경제적이며 제어부의 안정성을 높일 수 있다.

하지만 단락시 발생하는 단락전류의 크기가 크므로 풍력발전기의 전기자 권선 및 슬립링에 소손이 발생할 가능성이 높다.

이를 보완하기 위해서 본 연구에서는 마이크로 컨트롤러를 이용한 전기식 제동방식을 사용하였다.

3.1 개방회로시험

개방회로 시험에서 발전기는 최대풍속에 의하여 회전하여야 한다. 개방회로시험은 그림 1과 같이 실행하며, 시험에서 얻은 개방회로의 선간전압은 $V_{oc,line}$ 라 칭한다.²⁾

3.2 단락회로시험

그림 2에서 보이는 바와 같이 세 개의 선을 모두 단락시키고, 발전기는 최대속도로 바람에너지에 의하여 회전되어야 하며, 단락

회로시험에 의하여 얻어진 선전류의 평균치를 $I_{SC,line}$ 라 칭한다.

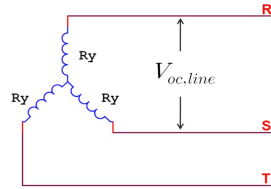


그림 1. 개방회로시험

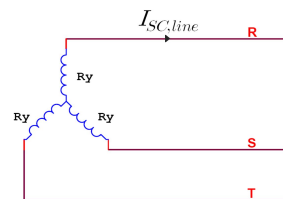


그림 2. 단락회로시험

3.3 단락전류

단락회로시험에서 얻은 상전류에 대한 개방회로시험에서 얻은 상전압의 비율을 계산하면 한 상에 대한 동기 임피던스가 된다.

$$Z_s = \frac{V_{OC,phase}}{I_{SC,phase}} [\Omega] \quad (1)$$

여기서 Z_s 는 상당 동기 임피던스이다. 동기발전기의 환상의 저항 R_a 를 구하고 식(1)에서 Z_s 를 구하여 직렬임피던스 식에 넣으면 동기리액턴스를 구할 수 있다. 따라서 그림 3의 등가회로부터 동기발전기 전기자 한 상에서의 동기리액턴스는 식(2)와 같다.

$$Z_s = R_a + jX_s \Rightarrow X_s = \sqrt{Z_s^2 - R_a^2} \quad (2)$$

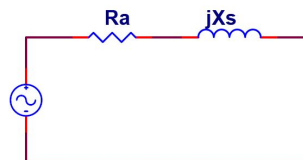


그림 3. 한 상에 대한 등가회로

등가회로의 전압 평형 방정식을 정의하면 다음 식과 같다.

$$Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} = V_m \sin \omega t \quad (3)$$

단락 직전의 전류의 초기조건은 부하전류를 무시하여 0으로 하고 양변을 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$RI(s) + LSI(s) = \frac{V_m \cdot \omega}{s^2 + \omega^2} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} I(s) &= \frac{V_m \cdot \omega}{(R + sL)(s^2 + \omega^2)} \\ &= \frac{V_m \cdot \omega}{L \cdot (s + \frac{R}{L})(s + j\omega)(s - j\omega)} \\ &= \frac{V_m \cdot \omega}{L} \cdot \frac{1}{(s + \frac{R}{L})(s + j\omega)(s - j\omega)} \end{aligned} \quad (5)$$

이것을 Heaviside의 부분분수 전개를 하여 각 항의 계수를 구하면

$$\begin{aligned} &\frac{V_m \cdot \omega}{L} \cdot \frac{1}{(s + \frac{R}{L})(s + j\omega)(s - j\omega)} \\ &= \frac{V_m \cdot \omega}{L} \cdot \left[\frac{A}{s + \frac{R}{L}} + \frac{B}{s + j\omega} + \frac{C}{s - j\omega} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} A &= \frac{1}{(-\frac{R}{L} + j\omega)(-\frac{R}{L} - j\omega)} \\ &= \frac{L^2}{R^2 + \omega^2 L^2} = \frac{L^2}{R^2 + X^2} \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} B &= \frac{1}{(-j\omega + \frac{R}{L})(-2j\omega)} \\ &= -\frac{L}{j2\omega(R - j\omega L)} = -\frac{L}{j2\omega(R - jX)} \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} C &= \frac{1}{(j\omega + \frac{R}{L})(2j\omega)} \\ &= -\frac{L}{j2\omega(R + j\omega L)} = -\frac{L}{j2\omega(R + jX)} \end{aligned} \quad (9)$$

이렇게 구한 각 계수 A, B, C를 부분분수로

전개해 놓은 원래의 식에 대입하고 Laplace 역 변환을 통해 최종적으로 I_s 를 구하면 다음과 같다.

$$I = \frac{V_m \cdot X}{R^2 + X^2} \cdot \frac{L^2}{R^2 + X^2} \cdot \frac{1}{s + \frac{R}{L}} - \frac{L}{j2\omega(R - jX)} \cdot \frac{1}{s + j\omega} + \frac{L}{j2\omega(R + jX)} \cdot \frac{1}{s - j\omega} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \therefore I_s &= \frac{V_m \cdot X}{R^2 + X^2} e^{-\frac{R}{L}t} \\ &\quad + \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + X^2}} \sin(\omega t - \theta) \\ [\theta &= \tan^{-1} \frac{X}{R}] \end{aligned} \quad (11)$$

이 결과식의 제 1 항이 직류성분을, 제 2 항이 교류성분을 나타내며 이 직류성분이 포함됨에 따라 초기 과도 단락전류가 비대칭 정현파로 되는 것이며 이 둘을 합성한 것으로 사고 직전의 전압을 나눈 값이 바로 초기 과도 리액턴스가 되며 시간이 경과함에 따라 점차 대칭 정현파로 안정해 가는 것이다. 위와 같은 단락전류의 변화를 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

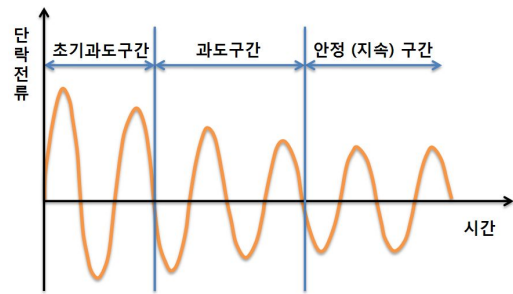


그림 4. 단락전류의 변화 과정

직류성분의 크기는 비대칭 교류성분의 크기를 결정하는 요소이며 이는 단락회로의 R:X의 비율(R:X Ratio=X/R) 및 전원전압의 최대치인 V_m 에 의해 결정됨을 알 수 있다.

$$I_{dc} = \frac{V_m \cdot wL}{R^2 + X^2} e^{-\frac{R}{L}t} = V_m \cdot \frac{\frac{X}{R}}{R(1 + \frac{X^2}{R^2})} \quad (12)$$

3.4 전기자 반작용

무부하의 경우 발전기의 자속은 계자 기자력만으로 만들어진다.

$$E = 4.44Kwfw\phi[V] \quad (13)$$

그러므로 유기 기전력식의 ϕ 는 계자 기자력만으로 정해지고 기전력 E 도 이것에 의하여 정해진다.

그런데 전기자에 전류가 흐르면 전기 자전류에 의한 기자력이 계자 기자력에 겹쳐서 작용하게 되므로 자속분포는 무부하의 경우와는 다르게 된다. 그러기 때문에 유기전압도 무부하의 경우의 전압보다 감소한다.

이와 같이 전기 자전류에 의한 자속 중에서 공극을 지나 자극에 들어가 계자 자속에 영향을 미치는 것을 전기자 반작용(armature reaction)이라 한다. 이 반작용은 전류의 크기가 같아도 역률에 따라서 그 작용이 다르게 된다.

전기자에 역률 0인 지상전류, 즉 기전력보다 90°만큼 위상이 뒤진 무효전류가 흐를 경우의 전류와 자극의 관계는 그림 5(a)와 같게 된다.

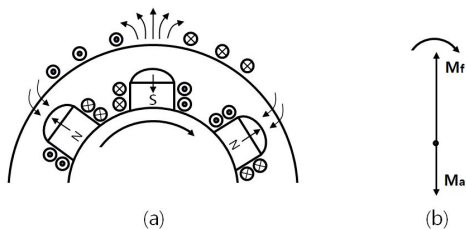


그림 5. $\frac{\pi}{2}$ 지상전류의 직축 반작용

즉, 그림 5(a)의 위치에 왔을 때, 바꾸어 말

하면 자극이 전기각 90°만큼 이동해서 유기기전력이 0이 되고 곧 방향이 반대로 되려고 하는 순간에 전류는 최대가 된다.

이 경우의 전기 자전류에 의한 반작용 기자력은 계자의 작용축과 일치하여 그림 5(b)와 같이 직축방향으로 작용하므로 직축 반작용(direct reaction)이라 하며, 계자 자속을 감소시키므로 감자작용(demagnetization)이라고도 한다.

전기자반작용은 감자기자력에 의한 주자속과 출력을 감소시키고 편자작용을 발생시킨다.³⁾

3.5 전기식 제동방식

본 연구에서 제안하는 제동방식은 동기발전기의 전기자 반작용을 이용한 전기식 제동방식이다.

풍력발전기에서의 단락은 돌발단락전류에 의한 강한 전기자 반작용이 발생한다. 이러한 전기자 반작용은 전기자 자속과 계자 자속의 강한 인력을 발생시켜 제동력과 감자작용이 발생하고 유기기전력을 감소시킨다.

식 12에서 단락전류는 직류성분과 교류성분으로 나타낼 수 있는데 이 두 성분은 발전기의 유기기전력과 비례한다. 즉, 단락사고에 의한 전기자 반작용은 유기기전력을 감소시키고 단락전류 역시 감소시킨다. 계자 자속과 전기가 자속의 인력이 블레이드의 회전력보다 클 경우 발전기는 정지하게 되며, 회전력이 더 클 경우 저속으로 회전하며 지속단락전류가 발생한다.

4. 실험 및 고찰

전기자 반작용을 이용한 전기식 제동방식은 돌발단락전류의 크기를 제한하지 않을 경우 전기자권선 및 슬립링, 스위칭 소자의 소손이 발생할 수 있다. 본 연구에서는 돌발단락전류의 크기를 제한하기 위해 마이크로컨

트roller를 이용한 PWM 제어 방식을 사용하였다.

4.1 실험 방법

전기자 반작용을 이용한 전기식 제동방식을 실험하기 위해 시스템의 상태를 측정하고 제어할 수 있는 제어장치를 구성하였다.

적정풍속에서는 발생한 전력을 배터리에 저장하는 동시에 부하에 공급한다. 풍속이 7m/s 이상일 경우 블레이드 보호를 위해 풍력발전기를 부하와 개방시킨 후 전기식 제동장치가 작동하도록 하였다. 또한 전기식 제동방식과 전기식 제동방식을 사용하지 않을 경우의 실험을 수행하여 비교 분석 하였다.

제어장치는 8bit AVR 마이크로프로세서인 ATmega2560을 사용하여 설계하였으며 그림 6은 장치 사진이며 그림 7은 장치 다이어그램이다.



그림 6. 장치 사진

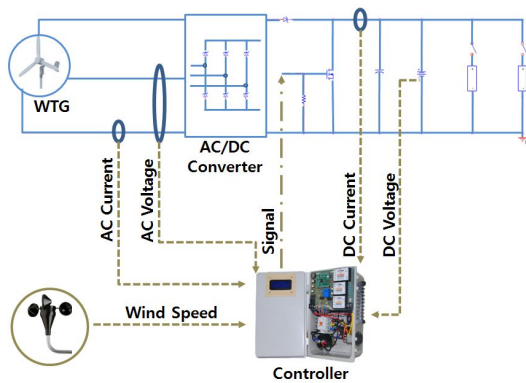


그림 7. 장치 블록 다이어그램

그림 8은 제어장치에 사용된 PI제어기의 블록도이다.

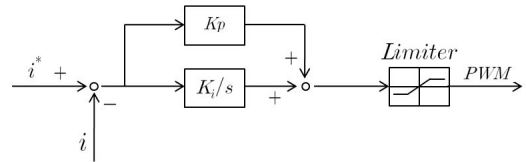


그림 8. PWM 제어 블록도

실험은 송풍기를 이용하여 풍속을 서서히 증가시키고 풍속 7m/s 이상일 경우 스위칭을 시작하였다. 단락점의 전압 및 풍력발전기에서 발생하는 교류 전류는 1초당 1000회를 샘플링하고 데이터를 PC로 전송하여 저장한다. 실험 제원은 표 2와 같다.

표 2. 실험 제원

마이크로 컨트롤러	ATmega2560
제동 풍속	7 [m/s]
스위칭 주파수	220 [Hz]
샘플링 주파수	1 [kHz]

4.2 실험 결과

실험에 사용된 풍력발전기는 회전 계자형으로 발전기 사양은 표 3과 같다.

표 3. 풍력발전기 사양

Output power	460 W
Rated speed	200rpm
Output Voltage	24Vdc
Continuous current at rated speed	16[A]
Max. Efficiency	89 %
Number of Poles	18
Speed Constant	161 V _{dc} /krpm
Inductance	0.43mH

(1) PWM제어 방식을 사용하지 않은 전기 제동방식

그림 8과 그림 9은 풍속 7 m/s 이상일 경우

단락시켜 제동할 경우의 전압, 전류를 풍속 7m/s에 도달하기 전 3초에서부터 나타낸 그래프이다.

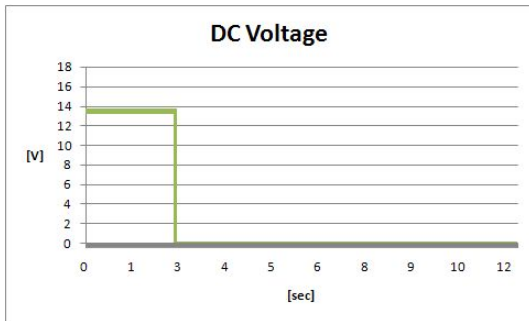


그림 9. 제동시 단락점 전압

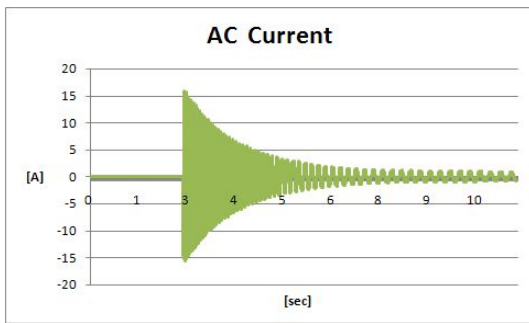


그림 10. 제동시 단락전류

그림 10의 단락전류는 그림 4와 같이 초기 과도구간으로 시작되어 안정구간으로 변화하는 것을 확인할 수 있다. 제동시 단락점 전압의 최대값은 단락 직전의 개방전압인 13.6[V], 최소값은 0[V]이며 제동시 단락전류의 최대값은 15.9[A], 최소값은 -15.6[A]로 측정되었다.

(2) 전기식 제동방식

그림 10과 그림 11는 전기식 제동방식을 사용한 경우의 그래프이다.

제동시 단락전류의 최대값은 7.1[A], 최소값은 -6.9[A]로 측정되었고 제동시 단락점 전압의 최대값은 단락 직전의 개방전압인 15.0[V], 최소값은 0[V]이다.

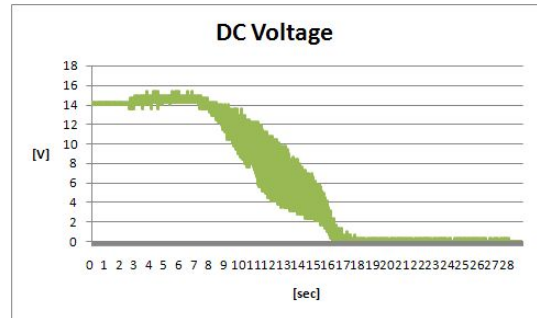


그림 11. 제동시 단락점 전압

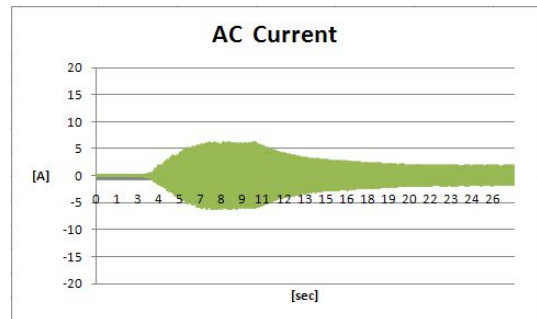


그림 12. 제동시 단락전류

PWM제어 방식을 사용하지 않은 전기 제동방식보다 단락 전류의 크기를 월등하게 감소시킬 수 있었으며, 안정구간에서의 단락전류는 정격전류 이하로 유지되며 회전속도를 감소시킬 수 있었다.

또한 안정속도에 도달하는 시간은 다소 길게 측정되었으나 제동이 시작된 지점으로부터 속도는 점차 감소하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 소형풍력발전에서의 제동 시스템을 제안하였으며 제어장치를 구성하여 그 성능을 확인하였다. 연구의 결론은 다음과 같다.

- (1) 전기식 제동방식을 사용하지 않는 방식의 경우 제동시 단락전류의 최대값은 15.9[A], 최소값은 -15.6[A]로 측정되었다.

- (2) 전기식 제동방식을 사용한 경우 제동시 단락전류의 최대값은 7.1[A], 최소값은 -6.9[A]로 측정되었다.
- (3) 전기식 제동방식을 사용하지 않은 경우보다 단락 전류의 크기를 월등하게 감소시킬 수 있었다.
- (4) 단락전류의 크기가 풍력발전기의 정격전류 이하(16A)를 유지 할 수 있으므로 전기자 권선과 슬립링에 영향을 미치지 않는 범위에서 제동이 가능함을 확인하였다.

후 기

한국에너지기술평가원 신재생에너지기술 개발사업에 의해서 작성됨.

참 고 문 헌

1. 에너지관리공단 신·재생에너지센터 & 산업자원부, 신·재생에너지 RD&D 전략 2030, 2008.1, pp.237
2. Hubert, Charles I 저, Electric Machines, Prentice Hall, p406~408, 2002.01
3. 조선기, 이영희, 이종호, 이광수 공저, 전기기기, 태영문화사, p144, 2008.02
4. Hiroshi Takami, Optimal Unity Power Factor Control of Permanent Magnet Synchronous Motor With q-axis Field by Inverse LQ Method, pp. 117 ~ 126 (10pages), 전력전자학회, 2001. 10