

풍력발전의 전력저장을 위한 배터리 충전회로에 관한 수학적인 모델링

고석철, 이 재, 임성훈, 강형곤, 한병성
전북대학교 전자정보공학부

A Mathematical Modeling on Battery Charging Circuit
for the Power Storage of Wind Power Generation

Seok-Cheol Ko, Jae Lee, Sung-Hun Lim, Hyeong-Gon Kang, Byoung-Sung Han
Division of Electronics & Information Engineering, Chonbuk National University

2. 본 론

Abstract - Wind power generation system is one of the most useful energy resource using natural environment. One of the biggest problem we encountered is that the wind speed is fluctuating sharply according to the weather conditions rather than it is stable. In this paper we do the equivalent modeling the mechanical energy of wind power turbine according to wind speed into the synchronous generator. We analyse the equivalent modeling output part of rectifier into DC/DC converter input part theoretically. We analyse a battery charging characteristics for power storage enabling the supply of stable power to the load. We design a system and do the modeling of it analytically so that it supplies a stable power to the load by constructing a DC-AC inverter point. Also we make a small size model usable in actual wind power generation system of 30kw and make an experiment and confirm its validity.

2.1 풍력발전 시스템

그림 1은 풍력발전 시스템의 전체 구성도이다. 풍력발전은 풍속의 변화로부터 최대의 전력을 얻기 위해 MPPT (Maximum Power Point Tracking)을 적용하는 벡부스터 컨버터부가 있다. 바람이 불지 않을 경우와 발전기의 보수나 태풍이나 돌풍과 같은 강한 바람이 불 경우 저장된 에너지를 부하에 공급하기 위한 배터리가 있다. 양방향의 DC/AC 인버터부, LC필터, 부하, 배전망 등으로 구성되어 있다.

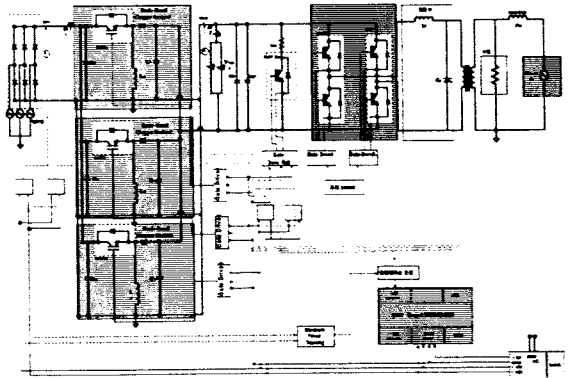


그림 1 풍력발전 시스템의 전체구성

1. 서 론

현대 정보화 사회에서 생활수준 향상 등에 따른 에너지 소비의 증가로 인한 기존 에너지 고갈과 대기 환경 오염 문제가 인류의 미래에 직면하게 될 가장 큰 문제로 인식되고 있다. 따라서 환경 친화적인 대체에너지 분야에 세계 여러 나라의 관심이 고조되고 있다[1]. 풍력발전은 미래의 에너지원으로 각광을 받고 있으며 지속적인 연구와 기술 개발이 절실히 요구되고 있는 실정이다. 풍력발전은 구조 설치가 간단하고, 디젤태양광 발전과 병렬운전이 가능하고, 환경 친화적이며 무한한 자원 활용 가능성이 있는 대체 에너지이다. 그러나, 발전시간과 전력 사용시간이 불일치하고, 자연의 영향과 수용가의 부하량에 영향을 받기 때문에 전기에너지를 일정하게 공급할 수 없으며, 불안정한 문제점을 가지고 있다. 해결방안은 전력저장 시스템을 이용하는 것이다. 이 시스템은 현재의 기술로 실용화가 가능하고, 전자기기의 다양화와 소형경량화로 2차전지 활용이 급속도로 확산되고 있으며 여러 분야에 응용되고 있다. 충전회로는 승강압용 컨버터를 사용하여 풍속에 따른 변동적인 전압을 정전압으로 만들어 배터리와 인버터에 공급하도록 했다. 또한 추가적인 발전설비시 하나의 배터리와 인버터에 병렬운전 사용이 가능하도록 했다.

본 연구에서는 연속전지의 특성 및 수학적인 등가모델을 제시하고,[2] 축전지의 직·병렬 연결시 등가모델을 세워 회로에 적용하였다. 또한, 발전시 풍속의 세기에 따른 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 등가회로 모델을 구성하여 풍력터빈의 특성 모델링, 동기발전기 모델링, 정류기 모델링, DC/DC 컨버터부를 모델링하여 배터리 충전 관계를 분석하였다. 풍속의 세기와 양에 관계없이 안정된 전력을 부하에 공급할 수 있는 배터리 충전 특성을 이론적으로 분석하였다. 충전회로를 축소제작하여 실험하였다.

연구자석형 브러시리스 동기발전기로부터 발전된 에너지를 공급받아 직류로 변환시켜 주기 위한 3상 브리지 정류회로와 정류된 직류전원은 풍속의 세기에 따라 최대전력점이 바뀌게 되는데 풍력발전기로부터 최대한의 전력을 얻어내기 위해서는 초퍼회로의 출력단 충전전류를 입력전력에 따라 제어하면 된다. DSP 제어기를 사용하여 초퍼회로의 제어신호인 통류율을 변화시키는 방법을 제안한다. 빠른 환경변화 수행이 좋더라도 비용이 많이 든다는 단점이 있지만은 풍력발전, 태양광발전, 디젤발전과 같은 복합발전 에너지원이 추가된다면 쉽게 수정이 가능하다는 장점이 있다. 발전전력에 따라 초퍼의 리액터에 유기된 전압은 배터리를 충전하게 된다. 또한, 인버터부와 필터부를 거쳐 부하에 유연하게 전력 공급이 이루어진다. 부하량이 적을 때는 배터리를 충전하게 되고, 바람이 불지 않아 발전이 되지 않을 때는 저장된 배터리의 에너지를 방전하여 사용할 수 있다. 이 시스템에서 벡부스터 초퍼를 사용했기 때문에 풍력발전기와 배터리측에 역송전이 없어서 많은 발전 설비들을 하나의 배터리와 인버터에 병렬로 연결하여 사용할 수 있다는 것이다. 본 논문에서는 현대의 발전기에 벡부스터 초퍼회로를 3병렬로 설계하여 초퍼회로 소자들의 부담을 줄였다.

2.2 납 축전지 모델링

납 축전지의 구성요소는 극판, 격리판, 전해액, 전조의 네 부분으로 되어 있다. 양극은 PbO_2 을 극판에 입힌 것이며, 음극은 Pb 으로 구성되어 있다. 전해액은 황산용액이 사용된다. 납 축전지에 저장된 화학 에너지는 전기에너지로 전이된다.

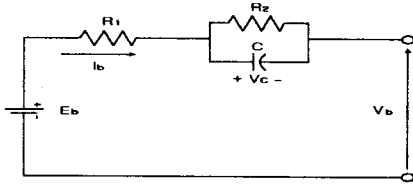


그림 2 납축전지의 등가회로

납축전지의 모델은 기전력에 직렬저항 및 커패시터가 삽입된 그림 2로 표시된 등가회로와 같으며 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_b = E_b - I_b (R_1 + R_2) + R_2 I_b e^{-\frac{t}{CR_2}} - V_c e^{-\frac{t}{CR_2}} \quad (1)$$

정상상태에서 배터리 전압방정식을 식 (2)으로 나타낼 수 있다[2].

$$V_b = E_b - I_b (R_1 + R_2) \quad (2)$$

식 (2)으로부터 내부저항을 구할 수 있다.

$$(R_1 + R_2) = \Delta V / I_b \quad (3)$$

여기서

V_b - 납축전지의 1셀의 단자전압

E_b - 납축전지의 1셀의 기전력

I_b - 1 셀당의 충전전류

C - 전극과 전해액 사이의 경계면에 형성된 전기이중층 커패시터

R_1 - 전극 저항을 포함한 전해액 저항

R_2 - 전극과 전해액 사이의 경계면에서의 충전전지저항

$R_1 + R_2 = r_{sb}$ - 납축전지 1셀의 내부저항

2.3 풍력터빈 특성 모델링

풍력터빈 특성을 간단한 방정식으로 표현하면 식 (4)~식 (10)으로 정의할 수 있다. 풍력터빈의 기계적인 출력 에너지는 식 (4)과 같은 방정식으로 나타낼 수 있다.[3]

$$P_t = 0.647 C_p(\lambda) A u^3 \text{ (Watt)} \quad (4)$$

$$T_t = \frac{P_t}{\omega_m} \quad (5)$$

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega_m}{u} \quad (6)$$

$$C_p(\lambda) = 0.043 - 0.108\lambda + 0.146\lambda^2 - 0.062\lambda^3 + 0.0104\lambda^4 - 0.0006\lambda^5 \quad (7)$$

$$T_t = 0.647 C_p(\lambda) A \frac{u^3}{\omega_m} = 0.647 A r \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} u^2 \quad (8)$$

$$C_T(\lambda) = \frac{C_p(\lambda)}{\lambda} \quad (9)$$

$$T_t = 0.647 A r C_T(\lambda) u^2 \quad (10)$$

여기서 λ 는 팁 스피드 비, u 는 풍속, r 는 터빈 로더의 반경, ω_m 은 풍력 터빈 로더의 기계적 각속도, P_t 는 풍력 터빈의 기계적 출력, T_t 는 풍력 터빈의 기계적 토크, A 는 바람의 통과 면적, $C_p(\lambda)$ 는 터빈 출력 계수, $C_T(\lambda)$ 는 터빈 토크 계수이다.

2.4 영구자석형 브러시리스 동기 발전기 모델링

발전기의 고정자 권선은 Y결선이며 3상의 각 고정자 권선은 전기각으로 상호 120° 의 위상차를 갖는다. 고정자 권선은 정현적으로 분포되므로 이상적인 경우 각상의 저항과 인덕턴스는 동일하며 해석시 복잡함을 피하기 위해 철손, 기계적인 손실 및 자속의 포화는 무시한다. a, b, c

3상의 교류를 고정부분과 회전부분인 고정 직교 좌표계 혹은 회전 직교 좌표계로 변환하는 2상의 d-q축 좌표계로 변환하면 그림 3과 같이 나타낼 수 있다.

동기발전기의 전압방정식을 식 (11)으로 나타낼 수 있다.

$$[V_{abc}^s] = -[r_{abc}^s][i_{abc}^s] + \frac{d}{dt}[L r_{abc}^s] \quad (11)$$

방정식인 식 (11)을 Park's 변환을 적용하여 기준 좌표에 대한 전압방정식으로 다시 나타내면 식 (12)과 같다.[4]

$$V_d^s = -\left(r^s + \frac{d}{dt}L_d^s\right)i_d^s - \omega_r L_q^s i_q^s + \omega_r \lambda_m$$

$$V_q^s = -\left(r^s + \frac{d}{dt}L_q^s\right)i_q^s + \omega_r L_d^s i_d^s \quad (12)$$

여기서 r^s 는 고정자 권선 저항, L_d^s 는 q축의 고정자 권선, L_q^s 는 d축의 고정자 권선, ω_r 는 발전기의 회전자 각속도, λ_m 은 영구자석에 의한 쇄교자속의 크기이다.

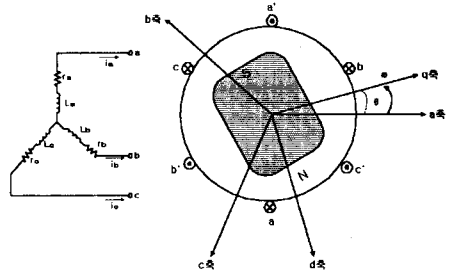


그림 3 브러시리스 동기발전기의 등가회로 모델

전기적인 토크 T_e 는 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) [(L_d^s - L_q^s) i_d^s i_q^s - \lambda_m i_q^s] \quad (13)$$

따라서 발전기의 전압 방정식을 기준으로 그림 4와 같이 동적 등가회로로 나타낼 수 있으며 정상상태에서는 d-q축 전류는 일정하므로 d-q축으로 발전기를 모델링한 등가회로는 그림 5로 나타낼 수 있다. 여기서 P는 동기 발전기의 극수이다. 발전기 회전자의 전기적인 각속도 ω_r 과 풍력 터빈 회전자의 기계적인 각속도 ω_m 사이의 관계식을 식 (14)으로 표현할 수 있다.

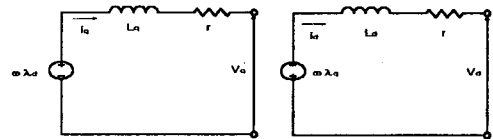


그림 4 동적 등가회로

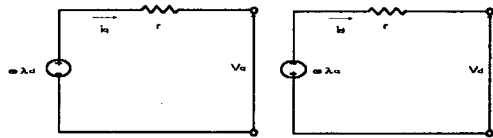


그림 5 정상상태에서의 등가회로

$$\omega_r = \frac{P}{2} \omega_m \quad (14)$$

발전기의 극수 P, 발전기 회전자의 전기적인 각속도 ω_r , 회전자와 부하의 관성모멘트 J와 전기적 토크를 기계적인 입력 토크로 표현하면 식 (15)으로 나타낼 수 있다.

$$T_t = J \left(\frac{2}{P}\right) \frac{d}{dt} \omega_r - T_e \quad (15)$$

여기서 기계적인 입력 토크는 풍력 터빈 토크 T_t 와 일치한다. 실제적인 영구자석형 동기기는 $L_d^s = L_q^s = L^s$ 으로 나타낼 수 있다.

$$V_o^s = - \left[\frac{(r^s + \frac{d}{dt} L^s)^2 + w_r^2 (L^s)^2}{r^s + \frac{d}{dt} L^s} \right] i_o^s + w_r \lambda_m \quad (16)$$

$$V_o^s = V_s^s, V_o^s = 0 \quad (17)$$

여기서 V_s^s 는 발전기 출력의 고정자 전압 크기이다. 만약 $w_r^2 (L^s)^2$ 이 무시된다면 방정식인 식 (16)은 선형적으로 된다. 이 근사값이 유효하기 위해선 V_o^s, w_r, T_e 가 0보다 크거나 같아야만 한다. 이렇게 되면 $w_r^2 (L^s)^2$ 가 무시되고 $L_o^s = L_s^s = L^s$ 및 식 (16)을 식 (17)과 식 (12)에 대입하면 식 (18)과 같이 표현될 수 있다.[3]

$$V_o^s = V_s^s = - \left(r^s + \frac{d}{dt} L^s \right) i_o^s + \lambda_m w_r \quad (18)$$

2.5 3상 정류기 모델링

정류기의 출력 전압을 간단히 표현하면 식 (19)으로 표현할 수 있다.

$$V_r = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_s \quad (19)$$

발전기측의 순시 유효전력은 DC 전력과 같아야 하고 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_r I_r = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (20)$$

$$V_r I_r = \frac{3}{2} (V_o^s i_o^s + V_s^s i_s^s) \quad (21)$$

$V_o^s = 0$ 이므로

$$V_r I_r = \frac{3}{2} V_s^s i_s^s \quad (22)$$

식 (22)과 식 (19)에서 $V_s = V_o^s$ 이므로 I_r 를 i_o^s 항으로 다시 쓰면

$$I_r = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} i_o^s \quad (23)$$

$$V_r = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} V_o^s \quad (24)$$

따라서, 동기발전기를 정류된 직류 전원으로 등가모델을 하면 그림 6과 같이 나타낼 수 있다. 단 정류된 전류 I_r 는 연속적으로 흐른다고 가정한다.

식 (18)과 식 (23)을 식 (24)에 대입하여 정리하면 식 (25)과 같이 표현할 수 있다.

$$V_r = - \frac{18}{\pi^2} r^s I_r - \frac{18}{\pi^2} L^s \frac{d}{dt} I_r + \lambda_m w_r \quad (25)$$

식 (13)에서 $L_o^s - L_s^s = 0$ 이므로 식 (15)에 대입하여 $\frac{d}{dt} w_r$ 항으로 정리하면 식 (26)으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{P}{2J} \left[T_r - \left(\frac{3}{2} \right) \left(\frac{P}{2} \right) \lambda_m i_o^s \right] \quad (26)$$

i_o^s 를 I_r 로 다시 정리하여 다시 쓰면

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{P}{2J} \left[T_r - \frac{3\sqrt{3}P}{2\pi} \lambda_m I_r \right] \quad (27)$$

식 (10)에서 풍력터빈의 기계적 토크를 입력토크로 표현하면 식 (28)과 같다.

$$T_r = 0.647 A r C_T(\lambda) u^2 \quad (28)$$

식 (28)을 식 (27)에 대입하여 정리하면

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{P}{2J} \left[0.647 A r C_T(\lambda) u^2 - \frac{3\sqrt{3}P}{2\pi} \lambda_m I_r \right] \quad (29)$$

그림 6의 등가회로에서 미분 방정식과 회전 속도 방정식을 표현하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} I_r = - \left[\frac{18}{\pi^2} r^s + R_r \right] I_r - \frac{1}{\left(\frac{18}{\pi^2} L^s + L_r \right)} V_{in} + \frac{1}{\left(\frac{18}{\pi^2} L^s + L_r \right)} \lambda_m \omega_r \quad (30)$$

$$\frac{d}{dt} V_{in} = \frac{1}{C_{in}} I_r - \frac{1}{C_{in}(R_{in} + R_o)} V_{in} \quad (31)$$

$$\frac{d}{dt} I_{in} = \frac{1}{C_{in}(R_{in} + R_o)} I_r - \frac{1}{C_{in}(R_{in} + R_o)} V_{in} \quad (32)$$

$$\frac{d}{dt} w_r = - \frac{3\sqrt{3}P^2 \lambda_m}{4\pi J} I_r + 0.647 \frac{P}{2J} A r C_T(\lambda) u^2 \quad (33)$$

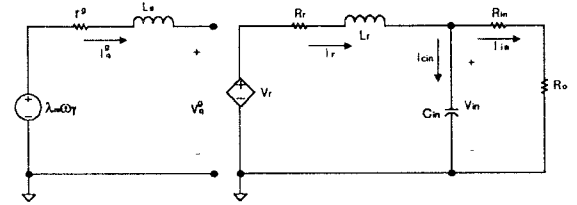


그림 6 3상 정류기와 동기발전기 등가회로

2.6 Buck-Boost 컨버터 설계

그림 7은 분석을 위한 실험모델 등가회로를 보여주고 있다. 이 회로를 분석하기란 매우 복잡해서 최대 출력점 주위에 동작점이 있다고 가정하고 그림 8과 같은 정상상태에서 풍력발전의 정류된 전압을 전압원으로 등가화시킬 수 있으며, 인버터부와 배전계통을 저항으로 더 간단하게 등가화 할 수 있다. V_r 은 등가 정류된 전압원이다. R_r 은 등가 권선 저항이고, L_r 은 동기 발전기로부터 정류된 누설 인덕턴스이다. r_{Ld} 는 리액터의 저항성분이다. r_b 는 배터리의 임피던스 값이다. 풍력 발전기로부터 최대 전력을 끌어내기 위해서는 벡부스터 컨버터의 인덕터 전류가 연속모드(CCM)로 동작해야 하므로 그에 맞게끔 인덕턴스의 크기를 선정해야 하며 V_{Cin} 의 리플은 정류된 직류전압의 리플을 초래하므로 최대한 작게 할 수 있도록 설계되어야 하며 커패시터 C_{in} 은 컨버터의 출력전압의 리플을 고려해서 선정해야 한다. 여기서는 리플전압을 1V 이하로 설계하였다. 정상상태에서 벡부스터 등가회로의 설계 값을 나타내면 다음과 같다. 인덕터 전압 v_{Ld} 의 평균값

$$V_{Ld} = V_{in} \cdot DT + (-V_o) \cdot (1-D)T \quad (34)$$

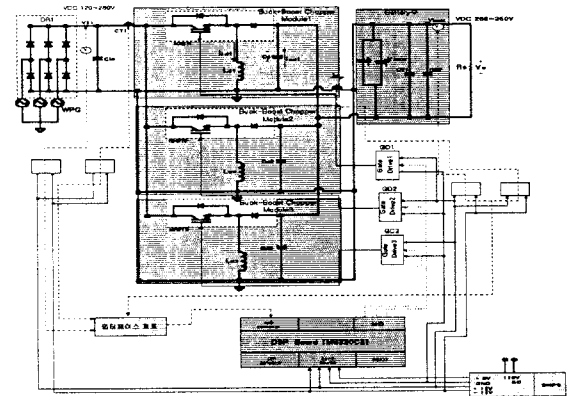


그림 7 실험모델 등가회로

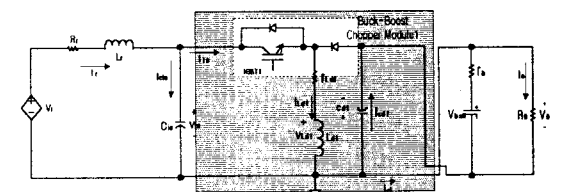
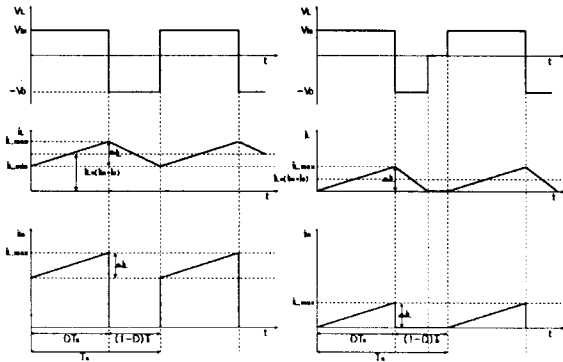


그림 8 DC-DC 컨버터 등가회로



(a) 연속모드 (b) 불연속모드
그림 9 Buck-Boost 컨버터 파형

정상상태에서 인덕터의 평균전압 $V_{L,av}$ 은 0이므로 이득값은 식 (35)과 같다.

$$G = \frac{V_o}{V_{in}} = \frac{D}{(1-D)} \quad (35)$$

정상상태에서 인덕터 전류의 최소값은 식 (36)과 같다.

$$i_{L,av} = \frac{V_o}{R_o(1-D)} - \frac{V_o}{2L_a}(1-D)T \quad (36)$$

이 컨버터가 전류 연속모드(CCM)로 동작하기 위한 인덕턴스 L_a 의 조건은 식 (37)을 만족해야 한다.

$$L_a > \frac{(1-D)^2}{2} R_o \cdot T \quad (37)$$

컨버터 출력전압 리플율을 구하면 식 (38)과 같다.

$$\frac{\Delta v_o}{V_o} = \frac{D \cdot T}{R_o \cdot C} \quad (38)$$

식 (38)으로부터 커패시터 값을 설계할 수 있다. 그림 9는 벡부스터 컨버터의 연속모드와 불연속모드시 각 부의 파형을 보여주고 있다.

2.7 시뮬레이션 및 실험 결과 고찰

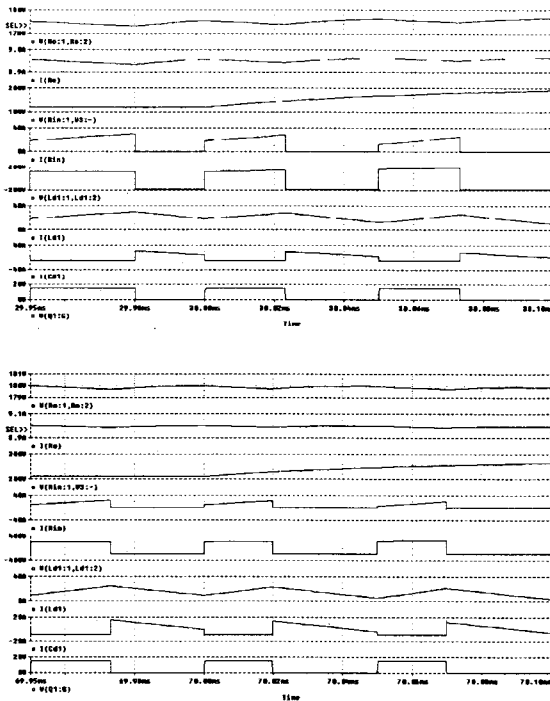


그림 10 입력전압 변화시 충전회로의 출력파형

그림 10은 풍속의 변화에 따른 정류된 직류전압 가변시의 승강압용 충전회로의 각 부의 파형을 보여주고 있으며, 그림 11은 실험을 하기 위해 제작된 배터리 충전회로를 보여주고 있다. 풍속 변화에 따른 풍력터빈의 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 등가모델을 통해 미분방정식과 회전속도 방정식을 유도하였다. 이 방정식은 복잡하기 때문에 Matlab 프로그램이나 C언어를 사용해서 실제 데이터 값과 시뮬레이션 값을 비교 검증해야 할 것이다.

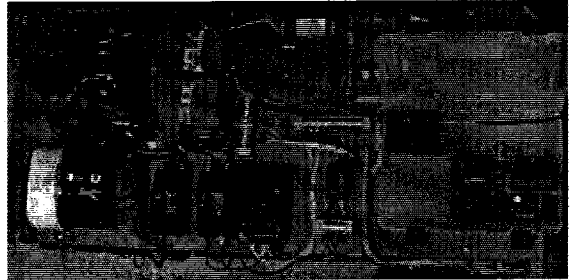


그림 11 배터리 충전회로 실험제작 사진

3. 결 론

발전시 풍속 변화량에 따른 기계적인 에너지를 전기적인 에너지로 등가회로 모델을 구성하여 미분방정식과 회전속도 방정식을 유도하였다. 풍속의 변화에 의해 발전기의 회전속도가 변화되고, 이 발전된 전력은 정류회로를 거쳐 DC/DC 컨버터부 입력단에 전력을 공급하게 된다. 발전된 전력을 최대로 활용하기 위해 벡부스터 컨버터부의 입력전류를 풍속의 변동에 따른 최대출력점에서 동작하도록 제어할 수 있다는 것을 보여주고 있다. 풍속의 세기와 양에 관계없이 안정된 전력을 부하에 공급하기 위한 배터리 직·병렬 저장방식인 승강압용 충전회로에 대해 살펴 보았다. 풍속의 변화량에 따른 DC/DC 컨버터부의 입력에너지 특성을 수학적으로 모델링함으로써 풍력발전으로부터 최대전력을 얻을 수 있는 최대전력점 추종제어 방식에 적용이 가능하다. 이 모델링은 부하량의 변화나 풍속의 변화시 배터리의 충전전 관계를 인식하는 데이터 기록계 등에 사용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 (00-지역-03)한국전력공사지원에 의하여 기초전력공학공동연구소 주관으로 수행된 과제 of 일부분임.

[참 고 문 헌]

- [1] 한국전력공사 전력연구원, "50kW 계통연계형 태양광 발전 시스템 개발" 최종보고서, pp1-229, 1999.10
- [2] Kawamura, A.; Yanagihara, T. "State of charge estimation of sealed lead-acid batteries used for electric vehicles" Power Electronics Specialists Conference, PESC 98 Record, 29th Annual IEEE, Vol.1, PP583-587, 1998
- [3] Borowy, B.S.; Salameh, Z.M. "Dynamic response of a stand-alone wind energy conversion system with battery energy storage to a wind gust" Energy Conversion, IEEE Transactions, Vol.12, pp73-78, 1997.3
- [4] 김일남의 "정현파 역기전력 특성을 갖는 브러시리스 동기 전동기의 모델링 및 특성해석" 대한전기학회논문지 제49 권 6호, PP380-385, 2000