

고효율 하이브리드 영구자석 발전기의 설계 및 제어방식

조영준¹, 이동희[†]

A Design and Control Scheme of a High Efficiency Hybrid PM Generator

Yeongjun Jo¹ and Dong-Hee Lee[†]

Abstract

This work presents a hybrid generator, which is a combination of a permanent magnet (PM) and winding structure with a PM exciter. The field winding of the proposed hybrid generator is fed by the PM exciter and the embedded current controller, which is installed in the generator shaft. In the no-load condition, the output voltage of the generator is produced by the PM flux of the generator without any field winding current. The field winding current produces an insufficient flux to retain the output voltage of the generator when the load is injected. The total efficiency can be increased from the PM exciter and PM flux of the generator. The field current has to be controlled inside the proposed generator. The generated power from the PM exciter is used to excite the field flux of the generator. The embedded current controller is commanded by the external voltage controller using the infrared wireless method. The 10 kW prototype hybrid PM generator is designed and tested to verify the effectiveness of the proposed system. The experimental results are compared with those of the winding generator with PM exciter.

Key words: Hybrid PM generator, PM exciter, High efficiency, Embedded controller

1. 서 론

발전기는 전력계통에서 가장 핵심적인 부품이며, 선박의 전원 장치뿐만 아니라, 육상용 비상발전기와 풍력 및 조력 발전 장치로 사용되고 있다. 발전기의 출력은 단독 또는 그리드에 접속되어 전력을 공급하게 되는데, 발전기의 종류와 구조에 따라 다양한 형태의 전력 변환장치가 적용되고 있다. 현재 풍력 발전장치는 유도발전기, 영구자석 발전기 등의 다양한 형태의 발전기들이 연구되고 있지만, 산업용 및 건물용 비상 발전기의 경우에는 대부분 권선형 여자기와 AVR(Automatic Voltage Regulator)를 결합한 형태가 가장 일반적으로 적용되고 있다^{[1]-[2]}. 기존의 권선형 여자는 외부의 AVR로부터 여자기의 계자전류를 공급받아서, 교류전압을 발전하고, 여자기의 교류전압은 발전기 내부에서 다이오드 정류기를

통해서 발전기의 계자권선에 연결되어 발전기에서 필요로 하는 계자자속을 발생하게 된다. 외부의 AVR은 발전기의 출력전압에서 PT(Potential Transducer)를 통해서 전력을 공급 받아서, 발전기의 출력전압을 제어하기 위해 여자에 계자전류를 제어하게 된다. 따라서, 실제 발전기를 제어하기 위해서는 발전기의 손실(동손, 철손 등)과 여자기의 손실 및 AVR과 PT의 손실이 발생하게 되며 이로 인하여 일반적인 발전기 시스템의 전체 효율이 감소하는 단점이 있다^{[1]-[2]}. 이에 비하여 여자기를 영구자석형 여자기로 대체하게 되면, 기존의 권선형 여자기에 비해 효율을 개선시킬 수 있는 장점이 있으나, 여자기의 출력은 발전기에 비해 크기 않기 때문에 효율 개선의 효과가 매우 크지 않다^{[3]-[4]}. 영구자석 발전기는 매우 높은 효율 특성을 가지게 되지만, 부하 변동과 주파수 변동에 대해서 발전기의 출력전압이 변동하게 되므로 별도의 DC/DC 컨버터와 DC/AC 컨버터를 사용하여 하는 단점이 있다^{[5]-[9]}. 하이브리드 발전기는 기존의 계자권선과 영구자석을 같이 사용함으로써 효율 개선과 기존 발전기의 제어 특성을 가질 수 있는 장점이 있다^{[10]-[11]}.

본 논문에서는 발전기 전체의 효율 개선을 위하여, 기존의 권선형 여자기 및 AVR을 대체하는 영구자석 여자

Paper number: TKPE-2018-23-2-6

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

[†] Corresponding author: leedh@ks.ac.kr, Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University
Tel: +82-51-663-4693 Fax: +82-51-626-4773

¹ Dept. of Mechatronics Engineering, Kyungshung University
Manuscript received Dec. 2, 2017; revised Jan. 2, 2018;
accepted Jan. 17, 2018

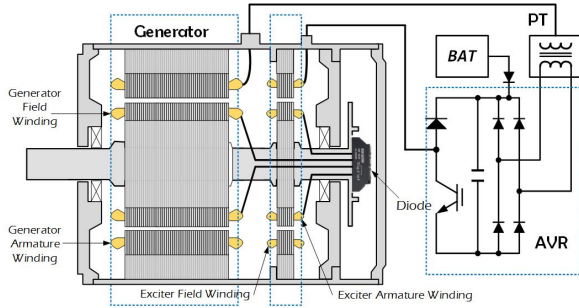


Fig. 1. Conventional generator with winding exciter.

기와 내장형 전류제어기를 설계하였으며, 발전기는 영구자석과 계자권선을 병렬로 구성하는 하이브리드 발전기를 제안하고 있다. 제안된 하이브리드 발전기는 기존의 권선계자형 발전기의 구조에서 절반을 기존의 계자권선을 사용하고, 나머지 부분은 영구자석 계자로 설계하여 기존 발전기에서 쉽게 적용이 가능하도록 설계 하였으며, 발전기의 계자권선과 여자기의 전기자 권선 사이에 내장형 전류제어기가 연결되어 발전기의 계자 전류를 제어하도록 구성하였다. 무부하 상태에서는 영구자석 계자자속을 통해서 발전기의 무부하 전압이 발생하게 되며, 부하가 인가되어 계자자속이 발전기의 출력전압을 유지하기 어렵게 되면, 내장형 전류 제어기에서 부족한 계자자속을 유지시키기 위해 계자전류를 보충하게 되므로, 부하에 대응하기 위한 계자자속이 영구자석과 같이 발생하게 되어 전체 효율이 개선되는 효과가 있다.

제안된 발전기의 구조를 검증하기 위하여 비상용 발전기용의 10[kW]급의 하이브리드 발전기와 내장형 전류제어기를 설계하였으며, 구동 시험을 통하여 그 성능을 검증하였다. 제작된 하이브리드 발전기는 실제 효율 시험과 제어 시험에서 기존의 권선형 발전기에 비하여 10[%] 이상의 효율 개선 및 영구자석 여자기를 가지는 발전기에 비하여 6[%] 이상의 효율 개선 효과와 안정적인 발전전압 출력 특성을 나타내었다.

2. 기존 발전기 제어 구조

그림 1은 기존의 발전기 구조와 전력변환 장치의 구조를 나타내고 있다. 실제 발전기는 주전력을 생산하는 발전부와 발전기의 계자자속을 발생하기 위한 여자기(exciter) 및 여자기의 계자전류를 제어하여 발전기의 출력전압을 조절하기 위한 AVR(Automatic Voltage Regulator)로 구성되어 있으며, AVR에 전력을 공급하기 위해 발전기의 출력전압을 변환하여 전력을 공급하는 PT(Potential Transducer) 및 비상용 배터리가 포함된다^{[1]-[3]}. 비상용 배터리는 발전기가 기동할 때, 잔류자속이 매우 낮아서 초기 기동 발전이 되지 않는 경우에는 AVR에 전력이 공급되지 않게 되므로, 비상용으로 초기 기동을 위한 전력을 공급하기 위해 사용된다.

비상 발전기 시스템에서 배터리를 사용하게 되므로 배터리의 방전 문제와 관리가 어려워지는 단점이 있다. 발전기의 출력전압은 발전기의 계자자속에 의해 결정되며, 발전기의 계자자속은 계자권선의 전류에 의해 발생되며 다음과 같이 표현된다.

$$V_{gen} = e_{gen} - R_s \cdot I_{gen} - 2\pi f \cdot L_s \cdot I_o \quad (1)$$

$$e_{gen} = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (2)$$

$$\Phi_m = K_m \cdot I_{fg} \quad (3)$$

단, Φ_m 은 발전기 주계자 자속을 나타내며, e_{gen} 은 발전기 내부 발전 전압을 나타낸다. 또한, R_s 와 L_s 는 발전기 전기자 권선의 저항과 인덕턴스 성분을 나타내고 있다. 한편 f 는 발전기 전압의 출력 주파수를 의미하며, I_{fg} 는 발전기 계자권선 전류의 크기를 의미하고, I_o 는 발전기 부하 전류를 나타낸다.

또한, 발전기의 계자전류는 여자기의 전기자 교류 출력전압을 발전기 축에 부착된 다이오드를 통해 정류하여 제어하게 되며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{fg} = \frac{1}{R_{gf} + 2\pi f_{rec} \cdot L_{gf}} \cdot (V_{rec} - e_{arm}) \quad (4)$$

단, R_{fg} 와 L_{fg} 는 발전기 계자권선의 저항 및 인덕턴스 성분을 나타내며, e_{arm} 은 발전기 전기자 반작용에 의한 전압성분을 의미한다. 한편, f_{rec} 는 여자기의 전기자 출력전압을 정류한 전압의 교류성분 주파수를 나타내며, V_{rec} 는 여자기의 교류 출력전압으로부터 다이오드 정류기를 통해 정류된 전압을 의미한다.

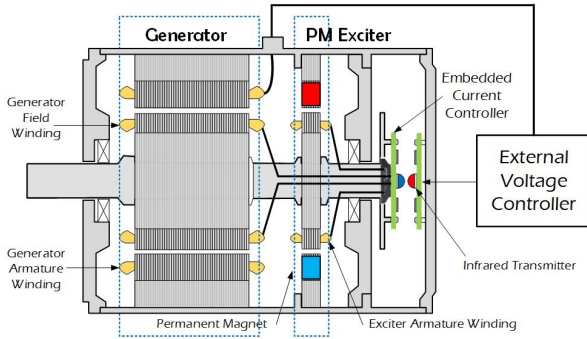
이때, 여자기의 전기자 교류 출력전압은 여자기의 계자 전류로부터 제어 되며, 여자기의 전기자 출력전압은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$V_{exc} = e_{exc} - R_{es} \cdot I_{fg} - 2\pi f_e \cdot L_{es} \cdot I_{fg} \quad (5)$$

$$e_{exc} = - \frac{d\Phi_{em}}{dt} \quad (6)$$

$$\Phi_{em} = K_e \cdot I_{fe} \quad (7)$$

단, R_{es} 와 L_{es} 는 여자기 전기자 권선의 저항과 인덕턴스 성분을 의미하며, f_e 는 여자기 출력전압의 주파수이고, Φ_{em} 은 여자기의 계자자속을 나타내고 있다. 이때, 여자기의 계자자속은 여자기의 계자 전류 I_{fe} 에 의해 발생되며, 발전기 외부의 AVR의 출력으로 제어되며, AVR은 다시 발전기의 출력전압이 PT로부터 변환된

Fig. 2. Generator with PM exciter^[3].

전력으로 공급받게 되므로, PT의 출력전압으로 정류된 AVR의 직류 링크단 전압을 V_{dc} 로 나타내면, 정상상태의 직류로 가정하여 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$I_{fe} = \frac{1}{R_{ef}}(d_{PWM} \cdot V_{dc} - e_{ef}) \quad (8)$$

단, R_{ef} 는 여자기 계자권선의 저항이며, e_{ef} 는 여자기 계자권선에 유기된 전압성분이고, d_{PWM} 은 PWM(Pulse Width Modulation)의 듀티비를 나타낸다.

그림 1의 기존의 발전기에서 손실성분은 여자기와 발전기 및 PT와 AVR에서의 손실의 합으로 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$P_{loss} = P_{exc} + P_{gen} + P_{PT} + P_{AVR} \quad (9)$$

각 여자기와 발전기에서 풍손(windage loss) 등과 같은 기계손을 제외하면, 대부분의 손실은 전기자 권선과 계자권선에서의 동손(copper loss)과 코어에서 발생하는 철손(iron loss)로 표현될 수 있다. 이때, 발전기를 구동하기 위한 여자기를 발전기 출력의 약 2~10[%] 내외에서 설계하게 되고, AVR 및 PT도 여자기의 용량을 고려하여 결정하게 되므로, 잘 설계된 10[kW]급 발전기의 경우 전체 효율은 78~85[%] 정도이다.

3. 제안된 하이브리드 발전기의 구조 및 설계

기존의 발전기의 효율을 개선하기 위해서는 여자기의 계자부를 영구자석으로 설계하는 방법이 적용되었다.

그림 2는 영구자석 여자기를 사용하는 발전기의 구조를 나타내고 있다^[3]. 그림 2에서 발전기 부분은 기존의 발전기와 동일하게 구성되어 있지만, 여자기 부분은 계자부분이 영구자석을 사용하여 전력을 발생하는 구조로 변경되었다. 따라서, AVR의 출력이 여자기의 계자자속을 제어하여 여자기의 출력전압을 조절하지 않고, 발전기의 회전속도에 따라 여자기의 출력전압은 일정한 교류전압을 발생하게 된다.

따라서, 발전기의 출력전압과 관계없이 발전기의 계자

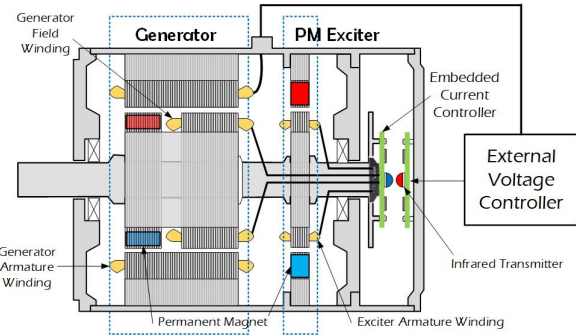


Fig. 3. The proposed hybrid generator with PM exciter.

권선에 전력을 공급할 수 있으므로, 기동 실패를 고려한 배터리의 사용이 필요 없게 되는 장점이 있다. 또한, 영구자석 여자기는 기존의 권선형 여자기에 비해 영구자석의 사용으로 인해 효율이 높아지는 장점이 있다. 하지만, 영구자석 여자기를 사용하게 되는 경우에는 여자기의 출력전압이 일정하여 발전기의 계자전류를 조절하기 어려우므로, 발전기 내부에서 발전기의 계자전류를 제어하기 위한 전류 제어가 필수적이다^[3]. 특히, 내장형 전류제어기는 발전기의 출력전압을 직접 검출할 수 없기 때문에 전압 제어를 위한 외부 제어기에서 발전기의 계자전류 지령치를 입력 받아야 한다. 이때, 내장형 전류제어기는 회전자에 부착되어 회전하게 되므로, 유선 방식이 사용되지 못하므로 무선 방식의 통신이 필요하게 된다. 본 논문에서는 회전자 축에 일치한 적외선 수신부와 송신부를 통해서 외부 제어기에서 발전기의 전압을 제어하는 계자전류 지령치를 송수신하도록 설계하고 있다. 영구자석 여자기 구조의 발전기에서 주발전기의 계자자속은 계자전류로 제어되며, 식 (1)~(3)으로 표현되는 기존 발전기와 동일하게 표현될 수 있다. 하지만, 발전기의 계자전류는 내장형 전류 제어기로부터 제어된다.

영구자석 여자기를 사용하는 발전기 시스템에서 발전기의 계자 전류는 여자기의 출력전압을 직류로 변환하여 직접 제어하게 되므로, 기존의 발전기에 비해서 시간 지연이 적고 응답성이 빨라지는 장점이 있다. 하지만, 여자기는 발전기의 용량에 비하여 10% 이하로 낮게 설계되므로, 영구자석 여자기로 설계되는 경우에 효율의 증가 효과가 매우 크지는 않다.

그림 3은 본 논문에서 제안하는 하이브리드 영구자석 발전기의 구조를 나타내고 있다. 그림 3에서, 기존의 발전기를 그대로 활용하면서 전체 발전기의 효율을 개선하기 위하여, 여자기는 영구자석 여자기의 구조를 사용하고, 주 발전기의 계자부를 권선형 계자와 병렬로 영구자석 계자를 추가하는 방식이다. 제안된 하이브리드 발전기에서 주발전기의 계자자속은 영구자석의 자속과 계자권선의 자속의 합으로 다음과 같다.

$$\Phi_m = \Phi_{PM} + K_f \cdot I_{fg} \quad (10)$$

TABLE I
SPECIFICATIONS OF THE GENERATOR AND EXCITER

Parameter	Value	
	generator	exciter
Rated Power	10[kW]	150[W]
Output Voltage	380[V]	135[V]
Pole number	4	8
Rated Speed	1,800[rpm]	1,800[rpm]
Diameter(rotor)	247[mm]	200[mm]
Diameter(Stator)	390[mm]	330[mm]
Stack length	50[mm]	24[mm]
Stack length(PM)	50[mm]	-
Stator turn number	10	13

이때 발전기의 발전전압과 부하상태에서의 출력전압은 다음과 같이 결정된다.

$$e_{gen} = - \frac{d\Phi_m}{dt} \quad (11)$$

$$V_{gen} = e_{gen} - i_o \cdot R_s - L_s \frac{di_o}{dt} \quad (12)$$

단, i_o 는 발전기 부하전류이며, R_s 와 L_s 는 발전기의 전기자 권선 저항 및 인덕턴스를 나타낸다. 식 (10) 에서 발전기 계자전류 I_{fg} 가 영인 상태에서는 영구자석의 계자자속만으로 발전기의 출력전압이 발생하며, 부하상태에서 발전기의 출력전압이 감소하게 되면, 계자전류가 상승하여 출력전압을 일정하게 유지하게 된다.

제안된 발전기의 특성을 검증하기 위해서 10[kW]급 하이브리드 발전기를 설계하였다. 표 1은 발전기와 여자기의 설계사양 및 설계 결과를 나타내고 있다.

그림 4와 그림 5, 6은 본 논문에서 설계한 영구자석 여자기와 발전기의 자속 분포도를 나타내고 있다. 그림 4는 영구자석 여자기의 자속 분포도이고 전체적으로 자속이 포화되지 않고 설계된 것을 확인할 수 있다. 그림 5와 6은 권선 계자형 발전기와 영구자석 계자형 발전기의 자속분포도를 나타낸다. FEM 해석에서 여자기와 발전기에서의 코어 자속밀도는 최대 1.6T 이하로 자속의 포화가 심하지 않게 설계되어 있음을 보이고 있다.

그림 7은 본 논문에서 제안하고 있는 하이브리드 발전기의 3D 모델을 나타내고 있다. 발전기 고정자 내부에 병렬로 권선 계자형 회전자와 영구자석 계자형 회전자가 위치하고, 발전기의 뒷부분에 설계된 150[W]의 영구자석 여자기가 배치되는 형태로 구성이 된다.

그림 8은 설계된 권선 계자형 발전기와 영구자석 계자형 발전기의 출력전압이다. 영구자석 계자형 발전기는

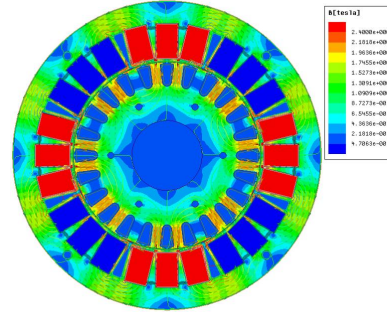


Fig. 4. Flux distribution of the PM exciter.

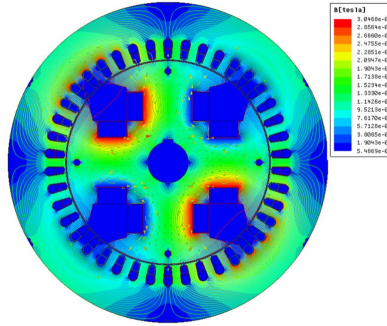


Fig. 5. Flux distribution of the field winding generator.

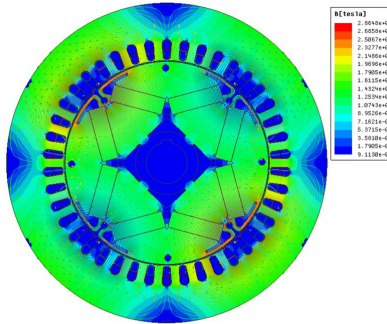


Fig. 6. Flux distribution of field PM of the proposed generator.

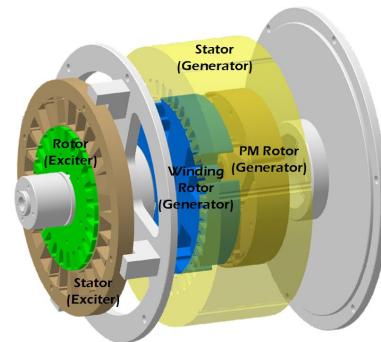
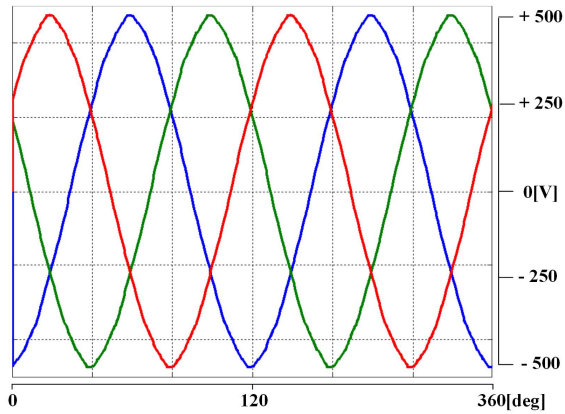
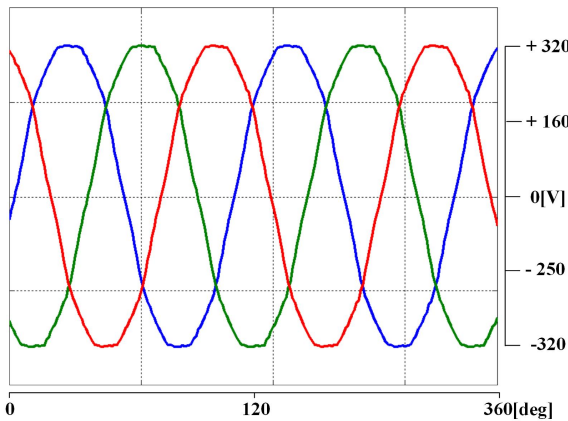


Fig. 7. 3D model of the designed hybrid generator.

정격속도에서 356[V]의 출력전압을 생성하도록 설계하였고 권선 계자형 발전기는 2[A] 인가 시 226[V]의 전압을 출력하며 부하 시 자계를 더하도록 설계하였다.



(a) Output voltage (PM field)

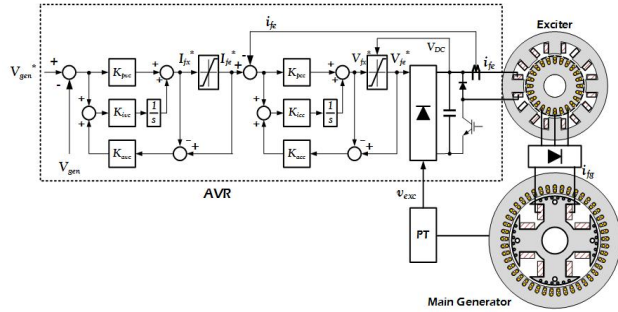


(b) Output voltage (Field winding)

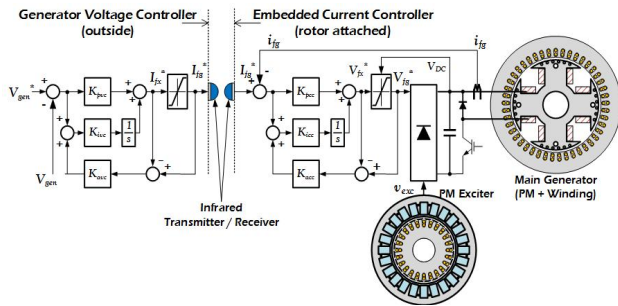
Fig. 8. Field winding and field PM generator output voltage.

4. 하이브리드 발전기 제어기의 설계

하이브리드 발전기의 제어를 위해서 본 논문에서는 발전기의 전압을 검출하여 계자 지령 전류를 생성하는 외부 제어기와 발전기 내부에서 발전기의 계자 전류를 제어하기 위한 내장형 제어기를 설계하였다. 그림 9는 기존의 권선형 발전기를 제어하기 위한 AVR의 구조와 본 논문에서 설계한 하이브리드 발전기의 내장형 및 외부 제어기의 제어 블록도를 나타내고 있다. 그림 9에서 그림 1의 기존의 권선형 발전기에 대한 제어기와 그림 3의 제안된 하이브리드 발전기의 제어기 구조에서 기본적으로 발전기의 전압을 제어하는 전압제어기와 전류를 제어하기 위한 전류 제어기의 구조는 PI 제어기로 동일하게 구성되어 있으나, 기존의 발전기의 전류 제어기는 여자기의 계자전류(i_{fe})를 제어하여 여자기의 출력 전압을 조절하고, 다시 여자기의 출력이 발전기의 계자전류를 제어하는 간접 제어 방식으로 구성되며, 제안된 방식에서는 발전기의 내부 제어기에서 발전기의 계자전류를 직접 제어하는 방식으로 구성되는 차이가 있다. 특히, 그림 9(a)에서 전류제어기가 여자기의 계자전류를 잘 제어한다 하더라도, 여자기의 출력전압은 발전기의 동작



(a) Conventional voltage controller



(b) Voltage controller of the proposed generator

Fig. 9. The compared voltage controller of the hybrid generator.

주파수, 여자기의 설계특성 등에 따라 차이가 발생하게 되므로, 발전기의 계자전류를 직접 제어하는 것에 비해 동특성 및 제어 특성이 좋지 않게 된다.

제안된 하이브리드 발전기에서는 영구자석 여자기를 사용하는 방식으로 설계하였으므로, 여자기의 제어 없이 독립적인 전원으로부터 직접 발전기의 계자전류(i_{fg})를 제어하게 되므로, 실제 제어기의 구현이 어렵지만 발전기 전압의 제어특성이 개선될 수 있다. 그림 9(b)에서 외부 제어기는 발전기의 출력전압을 검출하여 일정하게 유지시키기 위한 발전기 계자권선 전류 지령치를 발생하고, 이를 내장형 전류 제어기에 적외선 통신으로 송신하는 역할을 수행한다.

기존 발전기의 제어구조는 전압제어기, 전류제어기, 여자기 및 발전기 계자권선을 통해서 다음과 같은 전달 특성을 가지게 된다.

$$V_{gen} = \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) \cdot \left(\frac{K_B}{1 + sT_B} \right) \cdot \left(\frac{K_C}{1 + sT_C} \right) \cdot \left(\frac{K_D}{1 + sT_D} \right) \cdot \Delta V_{gen} \quad (13)$$

단, K_A , K_B , K_C 및 K_D 는 전압제어기, 전류제어기, 여자기 및 발전기 계자권선에서의 증폭특성을 나타내며, T_A , T_B , T_C 및 T_D 는 전압제어기, 전류제어기, 여자기 및 발전기 계자권선에서의 시간 지연을 나타내고 있다. 이에 비해 그림 8(b)의 제어구조에서는 여자

기의 과정이 없이 다음과 같이 전달 특성이 단순해지는 장점이 있다.

$$V_{gen} = \left(\frac{K_A}{1 + sT_A} \right) \cdot \left(\frac{K_B}{1 + sT_B} \right) \cdot \left(\frac{K_D}{1 + sT_D} \right) \cdot \Delta V_{gen} \quad (14)$$

제안된 발전기의 외부 제어기에서 발전기의 출력전압은 전류형 PT 2개를 통해서 UV상과 VW상 전압을 검출하여, 순시 발전기 전압은 삼상 선간 전압의 2상 변환을 통해 다음과 같이 검출된다.

$$v_{wu} = -(v_{uv} + v_{vw}) \quad (15)$$

$$v_{dss} = v_{uv} \quad (16)$$

$$v_{qss} = \left(\frac{1}{\sqrt{3}} \right) \cdot (v_{vw} + v_{wu}) \quad (17)$$

$$V_{gen} = \sqrt{v_{dss}^2 + v_{qss}^2} \quad (18)$$

발전기 출력전압을 제어하기 위한 계자권선의 지령전류는 Anti-Windup을 가지는 PI제어기로 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta V_{gen} = V_{gen}^* - V_{gen} \quad (19)$$

$$I_{fg(k)}^* = K_{pvc} \cdot \Delta V_{gen} + K_{ivc} \quad (20)$$

$$\cdot \int (\Delta V_{gen} + K_{avc} \cdot (I_{fg(k-1)}^* - I_{fx}^*)) \cdot dt$$

단, K_{pvc} , K_{ivc} 및 K_{avc} 는 발전기 전압 제어기의 비례이득, 적분이득 및 Anti-Windup 제어 이득을 나타내며, $I_{fg(k)}^*$ 는 발전기 계자 지령 전류를 나타낸다. 외부 제어기의 지령 전류는 2바이트의 직렬 통신 데이터로 변환하여 19200bps 통신속도로 적외선 송신을 하게 되며, 통신에 소요되는 시간은 1[ms]에 해당한다.

내장형 전류 제어기는 외부 제어기로부터 적외선 통신으로 전류 지령치를 입력받아서, 발전기의 계자권선에 흐르는 실제 전류와 비교하여 외부 제어기의 지령전류와 일치하도록 PI 제어기로 구성하여 다음과 같이 제어하게 된다.

$$V_{fg(k)}^* = K_{pcc} \cdot \Delta i_{fg} + K_{icc} \quad (21)$$

$$\cdot \int (\Delta i_{fg} + K_{acc} \cdot (V_{fx}^* - V_{fg(k-1)}^*)) \cdot dt$$

$$\Delta i_{fg} = I_{fg}^* - i_{fg} \quad (22)$$



(a) External voltage controller



(b) Embedded current controller

Fig. 10. External voltage controller and embedded current controller.

단, K_{pcc} , K_{icc} 및 K_{acc} 는 내장형 전류 제어기의 비례, 적분 및 Anti-Windup 제어 이득을 나타내며, I_{fg}^* 는 외부 제어기에서 입력된 발전기 계자의 지령전류를 나타낸다. 내장형 제어기에서 지령전압은 PWM 출력을 통해 발전기의 계자권선에 직접 전달된다.

제안된 제어기는 TI(Texas Instruments)사의 TMS320F28052를 사용하여 설계하였으며, 외부 제어기에서는 2채널의 ADC(Analog-Digital Converter)를 통해서 발전기의 출력전압을 검출하고, 내부 제어기에서는 2채널의 ADC를 통해서 직류 링크단 전압과 계자전류를 검출하게 된다.

그림 10에서 설계된 외부 제어기와 내장형 제어기를 보이고 있다. 그림 10(a)의 외부 제어기에서는 적외선 송신부를 통해서 통신을 하고, 그림 10(b)의 내장형 제어기에서는 적외선 수신부를 통해서 계자전류 지령치를 수신하여 제어하게 된다.

5. 실험 결과

제안된 하이브리드 발전기의 검증을 위해, 설계된 10[kW] 발전기를 제작하여 그림 2로 표현되는 영구자석 여자기를 가지는 기존의 발전기와 비교 시험을 수행하였다. 기존의 발전기와 제안된 하이브리드 발전기는 고정자 권선과 구조는 동일하며, 회전자 구조에서 영구자석 부분이 대체된 형태로 설계되었다.

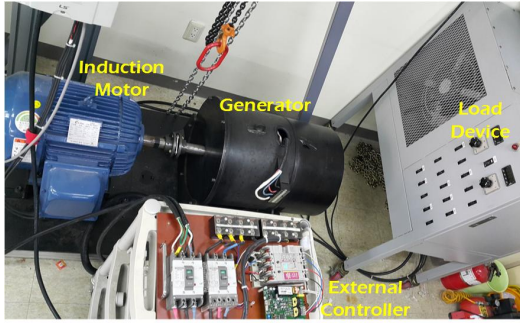
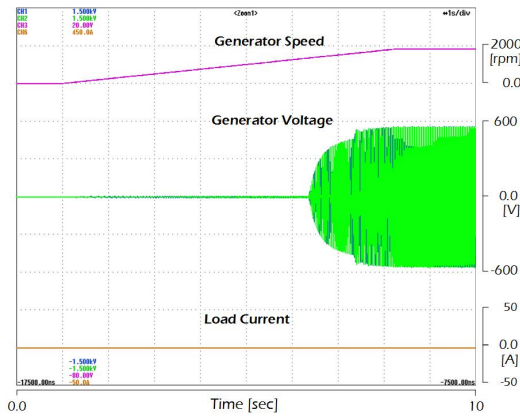
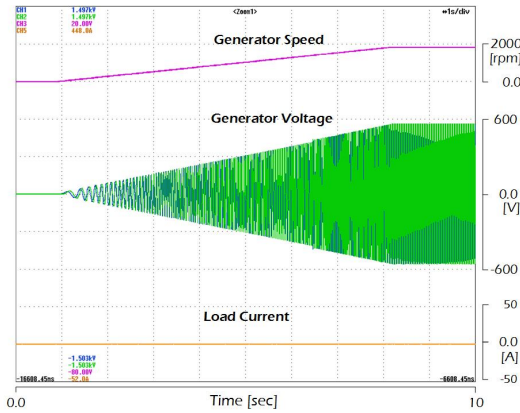


Fig. 11. Experimental configuration.



(a) Starting of winding generator with PM exciter

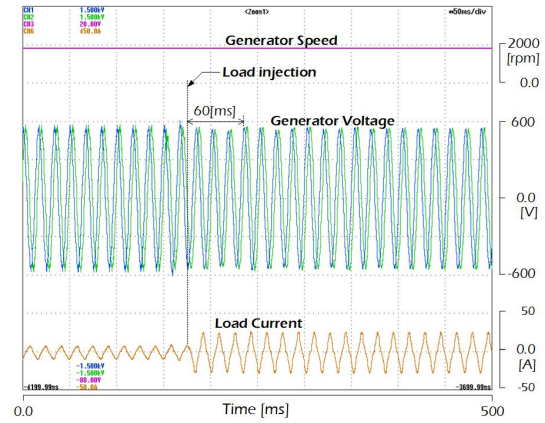


(b) Starting of the proposed hybrid generator

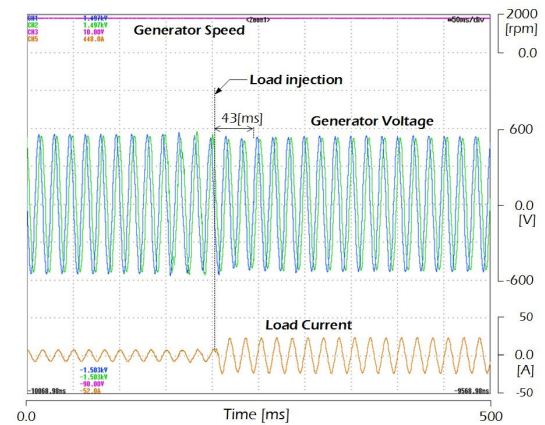
Fig. 12. Experimental results at the starting of the generator.

그림 11은 제작된 실제 하이브리드 발전기의 실험환경을 나타내고 있다. 발전기의 실제 구동은 디젤 엔진 대신 인버터로 구동되는 11[kW] 3상 유도 전동기를 통해서 구동하였고, 부하 장치를 연결하여 효율 및 발전 전압의 특성을 검증하였다.

그림 12는 기동상태에서의 전압 출력 특성의 비교 실험결과를 나타낸다. 그림 12(a)의 기존 권선형 발전기에서는 일정속도 이상에서 발전기 출력전압이 상승하여 제어상태에 돌입하고, 제안된 하이브리드 발전기에서는 영구자석 자속으로 기동하여 서서히 발전전압이 상승하



(a) A winding generator with PM exciter



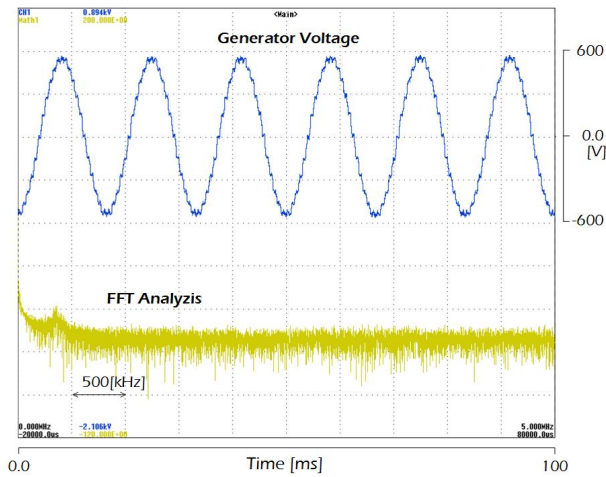
(b) The proposed hybrid generator

Fig. 13. Experimental results at the load variation(3[kW] → 10[kW]).

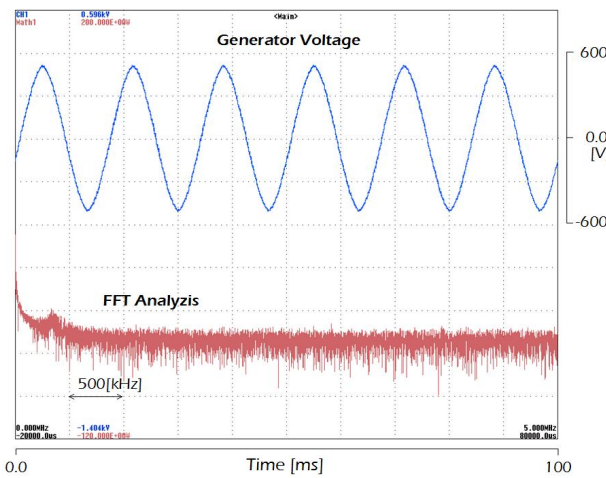
며 정격속도에 도달했을 때 정격전압을 출력 하는 걸 확인할 수 있다. 그림 13은 정상상태 시 부하를 3[kW]에서 10[kW]로 변동하였을 때 부하 특성의 비교 실험결과를 나타낸다. 부하에 따른 상전류 상승을 확인할 수 있다. 그림 13(a)의 기존의 발전기에서는 60[ms]의 응답 특성이 나타났으며, 그림 13(b)의 하이브리드 발전기에서는 43[ms]에서 정상상태 전압으로 복귀하였다.

그림 14와 그림 15는 발전기의 무부하 상태의 발전전압 및 FFT 분석 결과와 정격부하 상태를 나타내고 있다. 무부하 상태에서 제안된 하이브리드 발전기는 기존 발전기에 비해 THD(Total Harmonic Distortion)는 4.8[%]에 비해 1.6[%]로 나타났으며, 정격 부하상태에서는 4.3[%]이고, 제안된 하이브리드 발전기는 1.6[%]로 나타났다.

제안된 하이브리드의 발전기 효율은 기존의 권선형 발전기와 영구자석 여자기 구조의 발전기 및 제안된 발전기의 효율 비교 시험을 수행하였다. 표 2는 실제 실험결과로 측정된 발전기의 효율을 나타내고 있으며, 실험에서 제안된 하이브리드 발전기는 기존 영구자석 여자기형 발전기 대비 약 6[%] 이상의 효율 개선 효과를 나타내었다.



(a) A winding generator with PM exciter



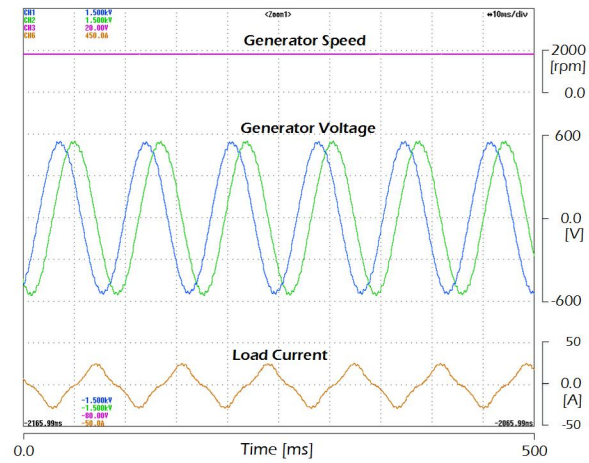
(b) The proposed hybrid generator

Fig. 14. Experimental results at the steady-state.

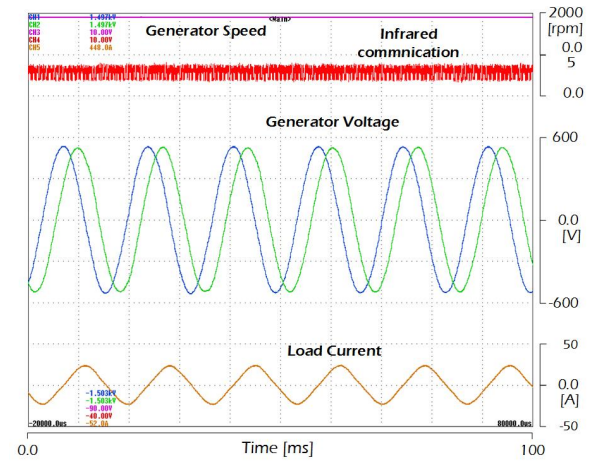
6. 결 론

본 논문에서는 기존의 발전기 구조에서 영구자석 계자를 병렬로 사용하고, 영구자석 여자기를 추가하여 전체 운전효율을 개선하기 위한 하이브리드 영구자석 발전기를 제안하였다. 제안된 발전기의 제어를 위해 발전기 내부에 내장형 전류제어기를 설계하였으며, 효율 특성과 전압 제어 특성을 시험하였다. 기존 발전기 구조에서 계자권선은 발전기의 부하에 대응하는 계자자속을 발생하고, 병렬로 추가된 영구자석 계자부는 무부하 상태에서 일정한 전압을 유지하기 위한 계자 자속을 발생함으로써, 발전기의 계자권선에서 발생하는 손실을 저감하였다. 또한 여자기의 구조를 영구자석 여자기로 설계함으로써 전체 효율이 개선되는 효율 특성을 나타내었다.

제안된 발전기는 기존 발전기의 구조를 그대로 사용하고도 추가된 영구자석 계자부로 인하여 구조 변경 없이도 효율이 개선되는 장점이 있다.



(a) A winding generator with PM exciter



(b) The proposed hybrid generator

Fig. 15. Experimental results at the rated load condition.

TABLE II
COMPARED EFFICIENCY AND SIZE

Parameter	Conventional Generator	PM Exciter Generator	Hybrid generator
Efficiency	82[%]	85[%]	91.5[%]
Stack of generator	100	100	100
Stack of exciter	48	48	24

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2015년 선정 기초연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. (과제번호 : R15XA03-19)

References

- [1] Y. Cao and J. Ma, "Research on PID parameters optimization of synchronous generator excitation control system," *CRIS Conf.*, pp. 1-5, Sep. 2010.

- [2] C. H. Cheng and Y. Y. Hsu, "Excitation control of a synchronous generator using a lookup table," *IEEE Trans. on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 27, No. 2, pp. 247-254, Mar. 1991.
- [3] Y. Jo and D. H. Lee, "A design and voltage control of a high efficiency generator with PM exciter," *Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 65, No. 11, pp. 1827-1834, 2016.
- [4] T. F. Chan, L. L. Lai, and L. T. Yan, "Performance of a three-phase AC generator with inset NdFeB permanent-magnet rotor," *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 1, pp. 88-94, Sep. 2004.
- [5] X. Yonghong, W. Shanming, M. Mingyuan, H. Liangliang, and Q. Ami, "Basic principles of hybrid excitation PM synchronous generator utilizing harmonic for excitation," *ICEMS*, Oct. 2010.
- [6] L. L. Amuhaya and M. J. Kamper, "Design analysis of a hybrid-PM synchronous generator for wind energy applications," *Domestic Use of Energy (DUE)*, pp. 163-167, Mar. 2015.
- [7] A. S. McDonald, "Hybrid excitation of synchronous generators for wind turbines," *2nd IET Renewable Power Generation Conf.*, pp. 1-4, Sep. 2013.
- [8] N. Lin, D. Wang, Y. Shen, and K. Wei, "Investigation on hybrid ratio between PM and current excitation sources for high-speed synchronous generator," *ICEMS*, pp. 22-25, Oct. 2014.
- [9] N. Schofield and A. A. Adsani, "Operation of a hybrid PM generator in a series hybrid EV power-train," *Vehicle Power and Propulsion Conference*, pp. 6-9, Sep. 2011.
- [10] J. F. Gieras, "PM synchronous generators with hybrid excitation systems and voltage control capabilities a review," *ICEMS*, pp. 2-5, Sep. 2012.
- [11] X. Yonghong, L. Junbo, H. Shaogang, and W. Shanming, "Research on field current control of hybrid excitation permanent magnet synchronous generator," *ICEMS*, pp. 25-28, Oct. 2015.



조영준(曹英準)

1991년 8월 12일생. 2016년 경성대 공대 메카트로닉스공학과 졸업. 2018년 동 대학원 메카트로닉스공학과 석사졸업.



이동희(李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2002년~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 메카트로닉스 공학과 교수. 당 학회 JPE 편집위원 및 총무이사.