

고속 호모폴라 발전기 모델링 및 과도특성 개선 연구

김인수*, 최상호^o, 오성업^m, 성세진^m
*국방과학연구소, ^o경주전장, ^m충남대학교

A Study of Modeling and Transient Characteristics Improvement of High Speed Homo-polar Generator

In-soo Kim*, Sang-ho Choi^o, Sung-up Oh^m, and Se-jin Seong^m

*Agency for Defense Development, ^oKyongju Aerospace Electrical Systems Co.,
^mChungnam National University

ABSTRACT

This paper describes the performance improvement of transient response and the modeling of small aircraft onboard generator. As the characteristics of the stator coil which are a major parameters of transient response were improved, the characteristics of transient response could be increased, therefore, the improved generator can be satisfied with large and fast load changes. Established the control model of the generator, it could be possible to do the analysis of generator performance, and improve the operational stability of the generator system using the control model.

1. 서 론

1.1 배경

최근 국내에도 항공 관련 산업의 비중이 커지면서 관련 전장품의 개발 수요가 발생하게 되었다. 소형 항공기 엔진 관련 전장품중 중요 부품중 하나인 발전기의 개발 필요성이 제기되어, 경량 및 고효율의 요구를 만족할 수 있는 호모폴라 (homopolar, 이하 HP) 발전기의 개발이 1차 이루어졌고, 이의 운용 과정에서 과도특성의 개선이 요구되어, 주어진 공간 내에서 정상상태 용량을 현실화하면서, 과도특성을 개선한 발전기의 수정개발이 최근 이루어졌다.

본 논문에서는 이 HP 발전기의 모델링 및 과도특성 개선내용을 기술하였고, 발전기의 컴퓨터 모델 분석을 통해 관련 제어기를 최적화함으로써 시스템 안정성을 개선하였다. 본 발전기의 수정개발 자료와 시험평가 결과를 바탕으로, 향후 개발될 소형 항공용 탑재 발전기의 전기적 규격 정립에 기초가 될 수 있는 기회가 되기를 바라며, 나아가 관련 전원규격 정립에도 기여할 수 있기를 기대한다.

1.2 호모폴라 발전기의 동작원리 ^[1,2]

소형 항공용에 주로 적용되는 발전기의 한 종류인 호모폴라 인덕터 (Homopolar Inductor, HP) 발전기가 그것의 장점인 경량 및 고효율의 특징 및 관련 소재인 회토류의 개발에 따라 최근 군용 및 항공산업에서 재조명되고 있다.

1924년에 라퐁 (Laffoon)은 HP 발전기의 동작을 가변 리럭턴스 머신 (variable reluctance machine)으로서 설명하였는데, 이 머신내의 회전부인 톱니모양 로타는 필드코일에 의해 여자된 플럭스 (flux)를 양 (positive)의 방향 내 최소와 최대사이에서 맥동하게 한다. 아마추어 도체에 유기되는 전압은 플럭스 쇄교 (linkage)의 변화에 의해 발생되게 된다.

1942년에 워커 (Walker)는 HP 발전기의 이론을 재검토하였는데, 이 논문에서 취급한 HP 발전기의 도해가 그림 1에 나타났다. 이 발전기는 공통프레임에 고정된 두 개의 박층 고정자 코어로 구성되는데, 이 박층 모양들은 두 고정자에 공통인 아마추어 권선을 갖기 위하여 가는 홈이 파여지게 된다. 계자 (field) 권선은 동심코일로서, 그 축이 발전기의 축과 일치하게 된다. 플럭스 라인중 하나를 그림 1에 나타냈다.

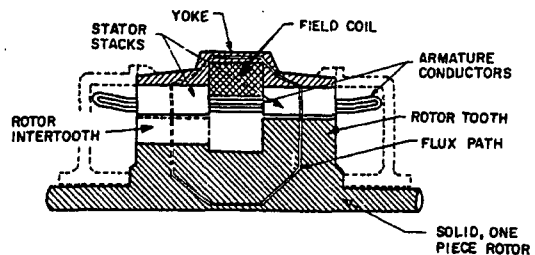


그림 1. HP 발전기의 축 단면도
Fig 1. Axis Cross Section of HP

2. 발전기 설계 및 요구규격

2.1 시스템 설계

HP 발전기의 2차 개발품에 대한 수정설계 제작은 발전기의 과도특성 개선 및 운용신뢰성 향상을 목표로 이루어졌으며, 수정개발 발전기의 블록도를 그림 2에 나타냈다.

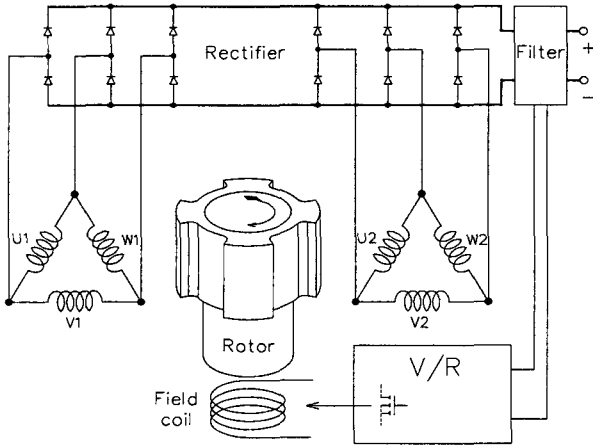


그림 2. HP 발전기 블록도

Fig 2. Block Diagram of HP Generator

2.2 제작 요구규격

수정개발 발전기의 주요 제작 요구규격을 표 1에 나타냈다.

표 1. 수정개발 발전기 제작규격

Table 1. Specification of Modified HP Generator

항목	규격	
정상상태 전압	30 ± 0.5VDC	
정격용량	60A@정상상태전압	
운용 RPM	25,000 ~ 35,000	
과부하용량	78A@정상상태전압, 2분	
레귤레이션	2A 부하 이내	34VDC max
	10% ~ 100% 부하	±1.5V 이내
리플 전압	0.5V _{RMS}	
과도상태 전압 (10%↔85% 부하변화)	정상상태전압 ± 9V, 회복 시간 50ms 이내	
냉각방식	엔진흡입공기의 자연냉각	

3. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

3.1 모델링

HP 발전기의 등가모델을 제어기 회로와 함께 그림3에 나타냈다.

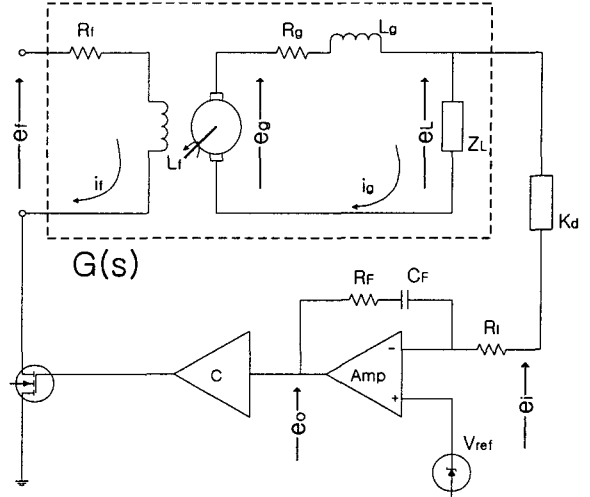


그림 3. HP 발전기 등가모델

Fig 3. Equivalent Model of HP Generator

발전기의 고정자 (stator) 권선에 유기된 전압 e_g 는 회전속도 n 과 계자 (field)에 의해 형성된 자속 Φ 의 함수이다.

$$e_g = K_1 n \Phi \quad (1)$$

e_g : 발전기 유기전압

K_1 : 상수

n : 회전수 (RPM)

Φ : 자속

자속 (Flux)은 계자전류 (Field Current)와 계자코일의 권선 (turn)수, 그리고 자속 경로 (path)상에 재료 및 구조에 따른 자기저항 R 에 관계된다. 이 관계는 자속 path 상 사용재료의 포화점에 도달할 때 까지는 선형관계로 볼 수 있으므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Phi = K_2 i_f \quad (2)$$

K_2 : 상수 (N(권선수)/R(자기저항))

i_f : 계자전류 (A)

식 (1)과 (2)에서 다음 식 (3)을 얻는다.

$$e_g = K_g i_f \quad (3)$$

$$K_g = K_1 K_2 n [V/A] \text{ (발전기상수)}$$

그림 6에서 계자전압 e_f 와 계자전류 i_f 의 관계식은 다음과 같다.

$$e_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (4)$$

식 (3)과 식(4)에서 계자전류 항을 소거하여 다음 식 (5)를 얻는다.

$$\frac{e_g}{e_f} = \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \quad (5)$$

제어대상 플랜트 전체의 전달함수 $\frac{e_L}{e_f}$ 를 구하려면 발전기 출력단에 연결된 실제부하특성을 알아야 하나 여기서는 단순화를 위해 부하를 1Ω (z_L)으로 하고, LC필터회로를 배제한한 전달함수 $\frac{e_L(s)}{e_f(s)}$ 를 구하면 식 (6)과 같게 된다.

$$\begin{aligned} \frac{e_L(s)}{e_f(s)} &= \frac{e_g(s)}{e_f(s)} \cdot \frac{e_L(s)}{e_g(s)} \\ &= \frac{K_g/L_f}{s+R_f/L_f} \cdot \frac{z_L}{sL_g+z_L+R_g} \end{aligned} \quad (6)$$

발전기 전압을 feedback하여 일정전압을 얻는 전압제어회로는 PI 제어기로서 제어기의 전달함수는 다음 식 (7)로 나타낼 수 있으며^[4], 발전기의 제어 블록도를 그림 6에 나타냈다.

$$\begin{aligned} \frac{e_o}{e_i} &= \left[\frac{R_F}{R_I} + \frac{1/(R_I C_F)}{s} \right] \\ &= \frac{K(\tau s + 1)}{s} \end{aligned} \quad (7)$$

with $K = 1/(R_I C_F)$, $\tau = R_F C_F$

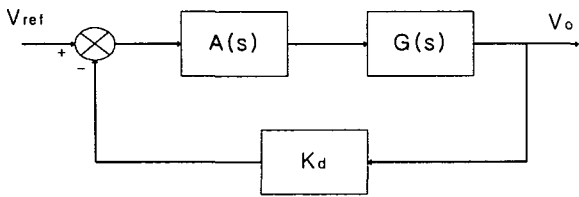


그림 4. HP 발전기 제어 블록도

Fig 4. Control Block Diagram of HP Generator

그림 6에서 A(s)는 HP 발전기의 PI 제어기 (비교기 포함) 전달함수이며, G(s)는 발전기의 필드회로를 포함한 발전기 전달함수이다. 그리고 Kd는 출력전압 30V와 기준전압 2.5V 사이의 순방향 이득값이다.

3.2 시스템 파라메타

발전기의 주 파라메타인 필드코일 인덕턴스값 (L_f)은 계측기 (LCR meter) 적용시 주파수에 따른 계측값의 변화로 인해, 발전기 개루프 (open loop) 실험값 (표 2참조)에서 도출하였으며, 필드코일 저항값은 계측값을 적용하였다. 발전기의 내부 저항값 (R_g) 또한 개루프 필드전류 1A 인가상태에서 부하변동에 따른 출력전압 강하특성으로부터 획득하여, 부하전류 투입시 고정자 권선에서 발생하는 역방향 자속을 포함시켜 반영하였다. 그림 7, 8에 발전기 부하특성을 PMG (Permanent Magnet Generator, self-excitation용) 와 나누어 각각 나타냈으며, 60A 발전기 특성이 고정자 권선의 개선에 따라 우수함을 볼 수 있다. 발전기 상수 (K_g)는 RPM 중간 (mid) 영역, 필드전류 1A에서의 출력전압을 기준으로 하

였으며, 발전기 고정자 권선의 인덕턴스는 과도상태 하강응답에서 전류변화에 대한 출력단 캐패시터의 전압상승 특성에서 획득^[3]하여 적용하였다. 표 3에 발전기 제작특성을 비교하여 나타냈으며, 표 4에 발전기 모델 파라메타 및 관련 제어변수들을 120A급 발전기와 함께 나타냈다.

표 2. 개루프 계단응답 @ mid RPM
Table 2. Open Loop Step Response @ mid RPM

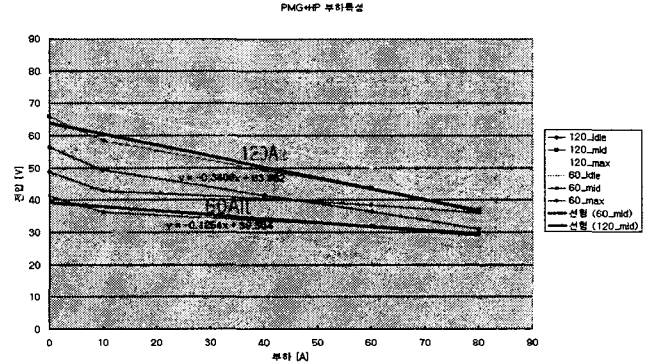
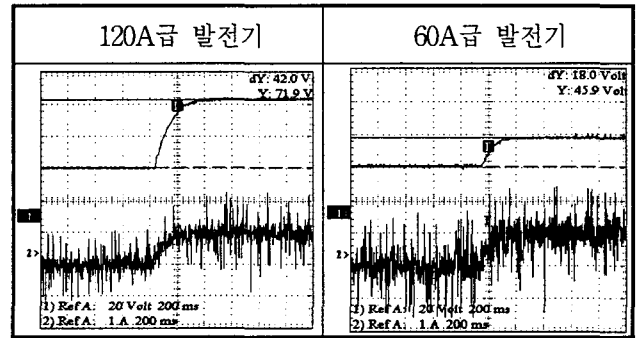


그림 5. PM + HP 발전기 부하특성 @ 필드전류 1A
Fig 5. Load Characteristics of PM+HP Generator @ Field Current 1A

표 3. 발전기 제작 특성

Table 3. Manufacturing Characteristics of Generators

		수정전 (120A)	수정후 (60A)
Stator	턴수	3	2
	적용권선	AWG22×9	AWG22×7
	권선방식	Y	Δ
	slot 수	24	36
	내경 [mm]	φ55	φ62
	길이 [mm]	45	34
Rotor	pole	8	6
	외경 [mm]	45	34
	호모폴 적층길이 [mm]	33	18
	PMG 크기[mm]	10.5×15×6.3	14.5×22.5×7
Field	턴수	570	450
	적용권선	AWG26	AWG25
Air Gap		0.25	0.25

표 4. 발전기 파라메타 및 제어 특성

Table 4. Parameters and Control Characteristics of Generators

		수정전 (120A)	수정후 (60A)
Plant	발전기상수[V/A]	42	18
	필드 인덕턴스	800mH	680mH
	필드 저항	12Ω	8Ω
	고정자 저항	330mΩ	90mΩ
	고정자 인덕턴스	75mH	7uH
평활필터	인덕턴스	-(주1)	15uH
	캐패시턴스	280μF	840μF
Controller	P_gain	12	72
	I_gain	920	152
System 특성	위상 마진 [°]	30.9	80.6
	게인 마진 [dB]	30.5	19.6
	대역폭 [rad/sec]	456	785

(주1) : Common mode L 140uH

3.3 시뮬레이션

모의분석에서 과도응답 (10A→80A)에 대한 특성을 얻기 위해 10A 부하모델 출력단에 스텝입력 (-7V)을 적용하여 수행하였으며, 자체 여자용 PM (Permanent Magnet) 발전부는 별도 블록으로 출력단에 더하여 처리했다. 그리고 RPM은 중간영역에서 분석했는데, RPM에 따른 발전기 상수의 변화는 크지 않으므로 분석에 문제는 되지 않는 것으로 판단된다.

시뮬레이션 모델을 그림 6에 나타냈으며, 모델 검증을 위한 과도상태 시험 (10A→80A 변화시) 결과를 시뮬레이션 결과와 함께 표 5에 나타냈으며, 이 결과로부터 모델링 결과 및 시험결과가 잘 맞고 있음을 알 수 있다.

본 발전기 모델에서 시스템 특성의 주 파라메타는 필드의 저항값 (R_f) 및 인덕턴스값 (L_f)에 크게 좌우되며, Stator 단의 특성은 상대적으로 고주파수 부분이어서 특성에 필드코일 만큼 큰 영향을 미치지 않는으나, 과도상태에서의 전압강하 (@전류상승) 및 전압상승 (@전류강하)에는 많은 영향을 미치는 것으로 분석됐다.

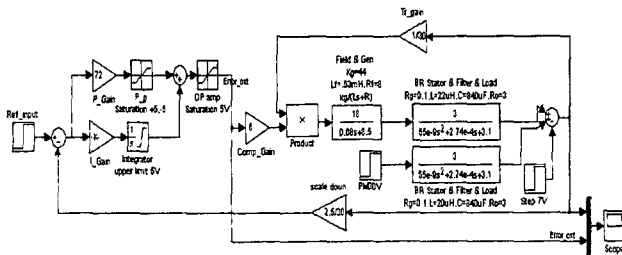
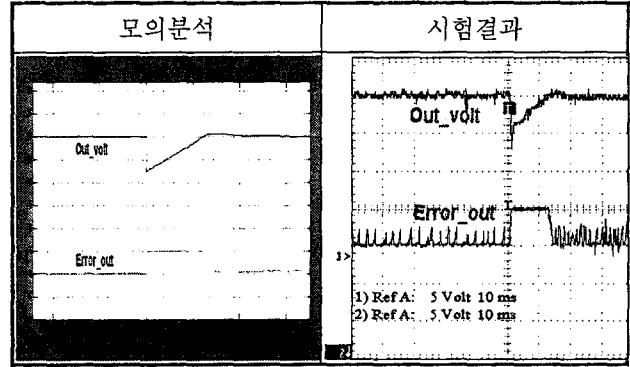


그림 6. 발전기 모의분석 모델
Fig 6. Simulation Model of Generator

표 5. 발전기 모델 검증

Table 5. Model Verification of Generator



3.4 제어게인 설정

발전기 제어기의 게인을 표 4에 나타낸 바와 같이 수정하여, 발전기 시스템의 위상마진을 키우고, 대역폭을 넓혀 발전기 특성을 개선하였다. 제어기를 포함한 발전기 시스템의 개루프 보데응답을 그림 7에 나타냈으며, 폐루프 계단응답을 그림 8에 1차 개발 발전기와 비교하여 함께 나타냈다. 그림 7, 8들을 통해 수정발전기의 위상특성 및 대역폭의 개선 등을 확인할 수 있으며, 다음 장에서의 시험결과를 통해 확인할 수 있었다.

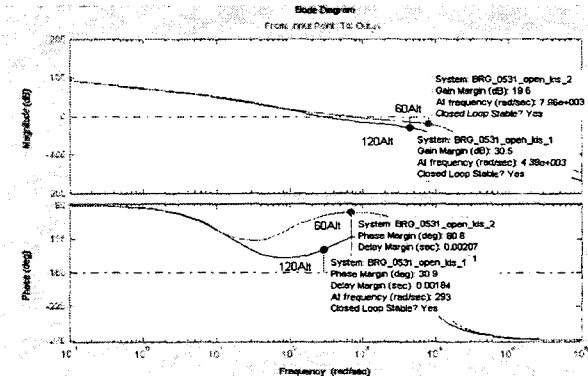


그림 7. 발전기 (제어기 포함) 개루프 보데응답
Fig 7. Open Loop Bode Response of Generator

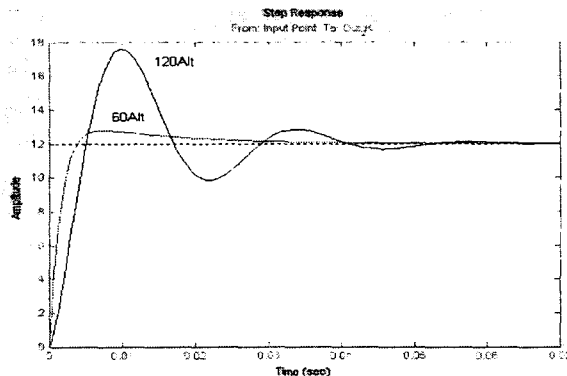


그림 8. 발전기 (제어기 포함) 폐루프 계단응답
Fig 8. Close Loop Step Response of Generator

4. 시험평가

수정 개발된 발전기 형상을 수정 전 형상과 함께 표 6에 나타냈으며, 성능시험 결과 중 과도특성 결과를 표 7에 나타냈다. 표 7을 통해 개발의 목적인 과도특성의 개선을 명확히 확인할 수 있으며, 이를 통해 시스템의 안정적 운용을 기할 수 있을 것으로 기대된다.

표 6. 발전기 형상 비교

Table 6. Configuration Compare of Generators

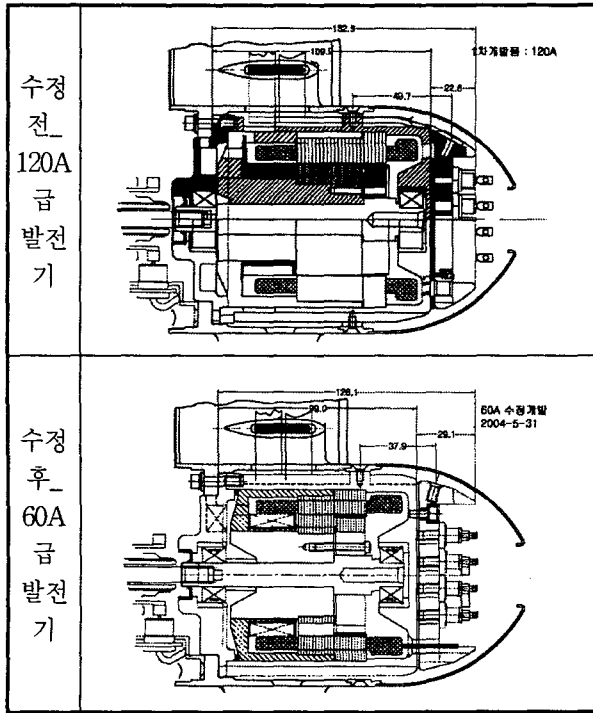
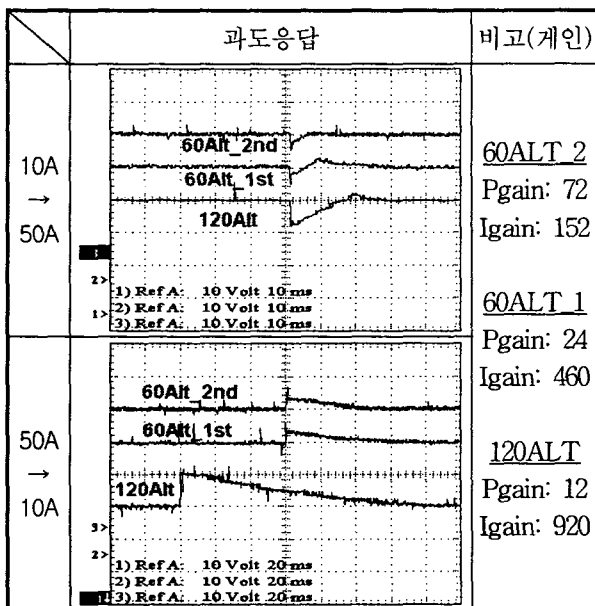


표 7. 과도응답 비교

Table 7. Compare of Transient Response



5. 결론

본 논문에서는 초소형 항공용 탑재 발전기의 모델링 및 과도응답 성능개선 내용을 기술하였다. 발전기가 점유할 수 있는 제한된 공간 내에서 발전기의 용량현실화를 통해, 과도응답 특성에 가장 큰 변수인 고정자 권선 저항을 줄일 수 있게 됨에 따라 개발목표를 이룰 수 있었다. 본 논문에서 기술되지 않은 필터단의 개선을 포함하게 되면, 수정 개발된 발전기는 수정개발 과도상태 규격 기준에서 수정전 발전기 응답의 약 50% 수준인 5V대의 변위특성을 나타내고 있으며, 대역폭 특성의 주요 변수인 필드코일 특성 및 제어게인 조정을 통해 회복 시간도 약 3배 이상의 개선을 이룩하였다.

또한 발전기의 제어모델을 수립하여, 발전기의 성능분석에 활용할 수 있게 하였으며, 발전기 설계시 안정성과 빠른 응답특성을 고려한 설계를 가능하게 하여, 전체 시스템의 운용 안정성을 증대시킬 수 있을 것으로 기대된다.

추후 연구과제로는 발전기 모델의 추가연구와 병행하여 부하모델을 연구 완성하여 통합 시스템 모델링 및 시뮬레이션 기반을 확립할 계획이다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Edward A. Erdelyi, "Synthesis of high speed homopolar alternators and theory of solid rotor electrical machines", dec. 1970
- [2] I. Boldea, Z.X. Fu, S.A. Nasar, "High-Performance Reluctance Generator," *Proceedings of the IEE*, Vol. 140, No. 2, pp. 124-130, 1993, March.
- [3] William G. Dunbar, Sidney W. Silverman, "Cruise Missile Power System", *Electrical Power System Technology*, Boeing Aerospace Company, March. 1986
- [4] John Van de Vegte, "Feedback Control Systems," third edition, Prentice Hall International Editions, 1994.