

고속 리럭턴스 발전기 제어모델 변수 설정 및 입증

김인수, 오성업, 성세진
 충남대학교 정보통신공학과

Control Model Parameters of High Speed Reluctance Generator Identification and Verification

Insoo Kim, Sungup Oh, and Sejin Seong

Department of Information Communication Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

In this paper, the improved performance of small aircraft onboard generator were described. As the characteristics of the field coil which are a major parameters of generator were improved, the system bandwidth could be increased, therefore the generator could also be satisfied with fast characteristic loads. Established the brief 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 제기되어져, 경량 및 고효율의 요구를 만족할 수 있는 호모폴라 (homopolar, 이하 HP) 발전기의 개발이 '90년대 말에 1차 개발되어졌고, 이의 운용 과정에서 최근 고전압 및 고속부하 시스템에 부합하는 용량 및 제어 대역폭을 만족하고, 출력 필터특성도 보강된 새로운 발전기의 개발 수요가 제기되어져, 지난 '02년 11월부터 '03년 9월까지 2차 개발이 이루어졌다.

본 논문에서는 이 HP 발전기의 2차 개발품에 대한 수정개발을 기술하였고, 발전기의 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 제안하였으며, 그 모델에 필요한 파라메타값을 제시하였다. 그리고 제안된 발전기 모델의 분석을 통해 전체 시스템 안정성을 살펴보았다. 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 특징에 따라 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.

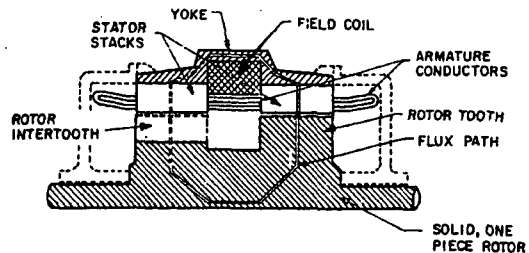


그림 1. HP 발전기의 축 단면도
 Fig 1. Axis Cross Section of HP

HP 발전기의 회전자는 그것이 운용될 고속 회전에 내

구성을 갖도록 단단한 철 단조로 만들어지며, 형상을 그림 2에 나타냈다. 회전자 치아로 불리는 왼쪽 및 오른쪽 돌극들은 왼쪽 회전자 치아 축이 오른쪽 치아 사이축과 같은 모점 (generatrix)을 갖도록 상쇄되게 되는데, 이는 두 개의 고정자 섹션에 같은 자속변화를 제공하기 위함으로, 이는 다시 두 고정자 코어내의 아마추어 도체에 유도되는 기전력이 더해지기 위해서이다. 가변 에어 갭 리액턴스 및 고정자 홈들을 그림 3에 나타냈다.

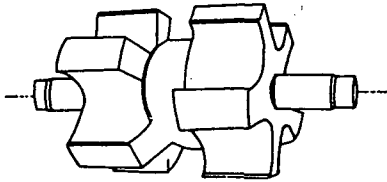


그림 2. 고체 회전자 단조 형상
Fig 2. Shape of Solid Rotor

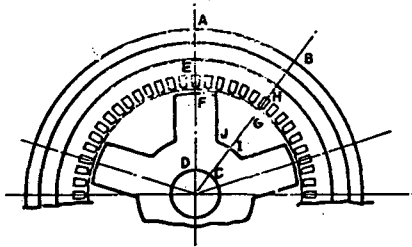


그림 3. HP 발전기의 방사상 단면도
Fig 3. Radial Cross Section of HP

아마추어 도체에 유도되는 기전력의 주기는 플럭스 변조의 완성주기에 일치하게 된다. 두 개의 연속된 톱니 중앙간의 거리는 보통의 동기발전기의 더블-폴 피치에 대응된다. 고정 권선내에 유도되는 주파수는 회전자 돌극의 수와 회전자가 운용되는 속도에 의해 결정된다. 만일 회전자에 p 개의 돌극이 있으면, 회전자의 1회전에 의해 각 고정자 도체에 p 사이클의 기전력이 유도되게 된다. 만일 회전자가 초당 n회전으로 회전하게 되면, 유도전압의 주파수는 다음 식 1과 같이 된다.

$$f = pn \text{ [Hz]} \quad \text{식 (1)}$$

HP 발전기의 장점은 그것의 단순성과 고속회전에서의 동작을 가능케 하는 강인한 구조이다. 그리고 어떤 브러쉬나 슬립링 그리고 회전자 권선의 불필요함이 HP 발전기를 매우 신뢰성 있는 기기로 만들게 한다. 반면 HP 발전기의 단점은 고정자 조립체의 철이 그것의 최대 능력으로의 동작을 방해하게 되는데, 이는 자속이 양의 최대에서 음의 최소까지 로의 최대 편위 (excursion)를

통한 스윙을 하지 않기 때문이다. 1000Hz 이상의 주파수에서 이 단점은 사라지게 되는데, 이는 고정자 철편내의 플럭스 편위가 과열을 유발하는 철편 손실의 집중을 피하기 위하여 더 높은 주파수에서 줄어들어야 만 하기 때문이다.

2. 발전기 설계 및 요구규격

2.1 시스템 설계

HP 발전기의 2차 개발품에 대한 수정설계 제작은 발전기의 성능향상 및 운용신뢰성 향상을 목표로 이루어졌으며, 수정개발 발전기의 블록도를 그림 4에 나타냈다.

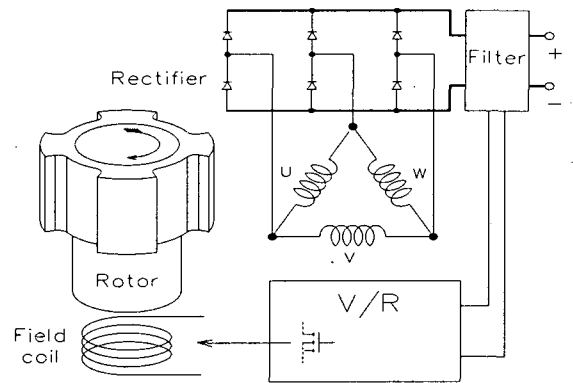


그림 4. HP 발전기 블록도

Fig 4. Block Diagram of HP Generator

2.2 제작 요구규격

수정개발 발전기의 주요 제작 요구규격을 표 1에 나타냈다.

표 1. HP 발전기 수정개발 요구규격

Table 1. Specification of Modified HP Generator

항목	규격	
정상상태 전압	29 ±0.5VDC	
정격용량	80A@정상상태전압	
운용 RPM	20,300 ~ 29,500	
과부하용량	105A@정상상태전압, 2분 운용 (130% 부하)	
레귤레이션	2A 부하 이내 (전 RPM 영역)	34VDC max
	10% ~ 100% 부하	±1.5V 이내
리플 전압	0.5V _{RMS}	
과도상태 전압 (50%↔100%)	정상상태전압 ± 9V, 회복 시간 50ms 이내	
냉각방식	엔진흡입공기의 자연냉각	
크기 및 무게	길이	242.5mm 이내
	지름	116.7mm 이내
	무게	5kg 이내

3. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

3.1 모델링

HP 발전기의 등가모델을 제어기 회로와 함께 그림5에 나타냈다.

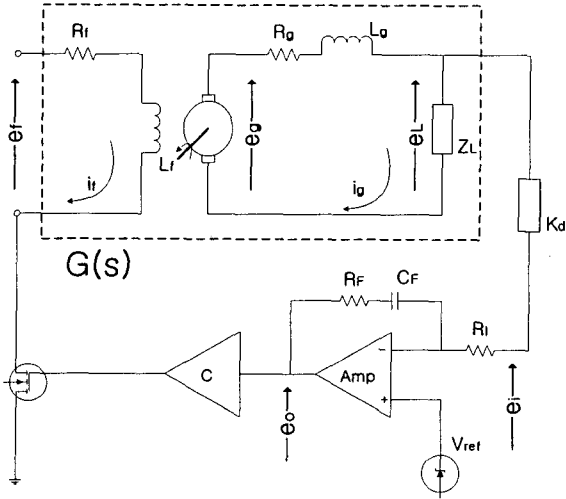


그림 5. HP 발전기 등가모델
Fig 5. Equivalent Model of HP Generator

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

$$e_g = K_1 n \Phi \quad (\text{식1})$$

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.

$$\Phi = K_2 i_f \quad (\text{식2})$$

K_2 : 상수 (N(권선수)/R(자기저항))
 i_f : 계자전류 (A)

식 (1)과 (2)에서 다음 식 (3)을 얻는다.

$$e_g = K_g i_f \quad (\text{식3})$$

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

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

$$e_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (\text{식4})$$

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

$$\frac{e_g}{e_f} = \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \quad (\text{식5})$$

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

$$\frac{e_L(s)}{e_f(s)} = \frac{e_g(s)}{e_f(s)} \cdot \frac{e_L(s)}{e_g(s)}$$

$$= \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \cdot \frac{z_L}{sL_g + z_L + R_g} \quad (\text{식6})$$

발전기 전압을 feedback하여 일정전압을 얻는 전압제어회로는 PI 제어기로서 제어기의 전달함수는 다음 식 (7)로 나타낼 수 있으며^[3], 발전기의 제어 블록도를 그림 6에 나타냈다.

$$\frac{e_o}{e_i} = \left[\frac{R_f}{R_i} + \frac{1/(R_i C_f)}{s} \right]$$

$$= \frac{K(\tau s + 1)}{s} \quad (\text{식7})$$

with $K = 1/(R_i C_f)$, $\tau = R_f C_f$

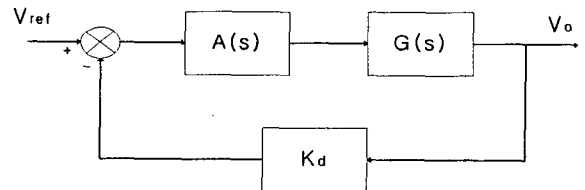


그림 6. HP 발전기 제어 블록도
Fig 6. Control Block Diagram of HP Generator

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 획득

발전기의 model parameter를 표 3에 나타냈다. 발전기 상수 (K_g)는 RPM 최대 영역 (29,500), 필드전류 1.5A에서의 출력전압을 기준으로 하였다. 그리고 필드 인덕턴스값 (L_f)은 주파수에 따른 변화로 인해, 발전기 개루프 (open loop) 실험값에서 도출하였으며, 발전기 저항값 (R_g) 또한 개루프 상태에서 부하변동에 따른 출력전압 특성에서 획득하여, 부하전류 투입시 고정자 권선에서 발생하는 역방향 자속을 포함시켜 반영하였다.

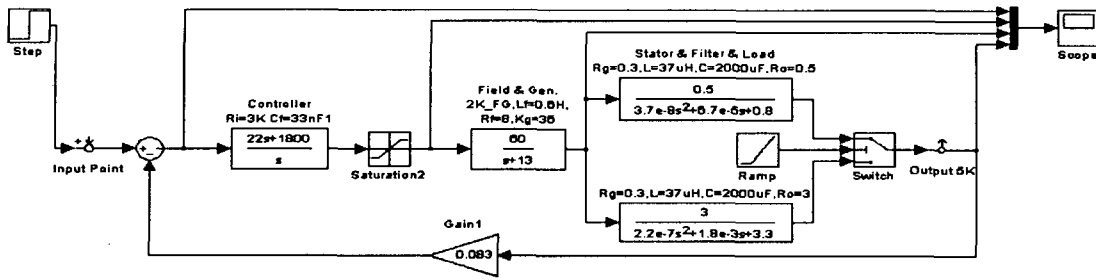


그림 7. 발전기 (2.4Kw) 시뮬레이션 모델
Fig 7. Simulation Model of Generator (2.4Kw)

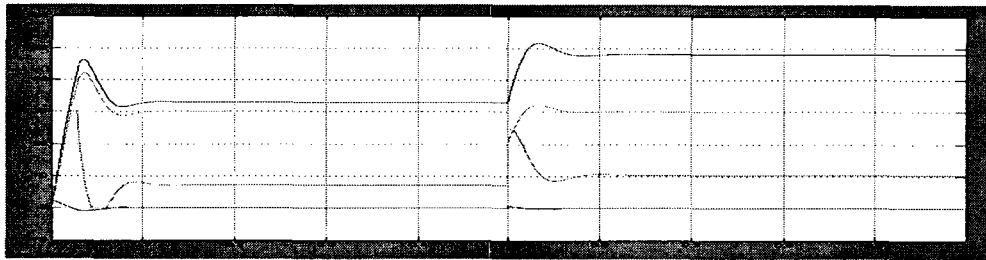


그림 8. 시뮬레이션 결과 (Mux 위로부터 청색, 연두, 적색, 하늘)
Fig 8. Simulation Results (from upper of MUX, Blue, Yellow green, Red, Sky blue)

표 2. 발전기 모델 매개변수
Table 2. Model Parameters of Generator

항목	Symbol	2차발전기 (80A정격)	1차발전기 (160A정격)
발전기 상수	K_g	36V/A	33V/A
필드인덕턴스	L_f	0.6H	1.5H
필드저항	R_f	8Ω	12Ω
발전기 인덕턴스 (필터 포함)	L_g	36.6uH	10.2uH
발전기 저항	R_g	0.3Ω	0.2Ω
부하	z_L	3Ω→0.5Ω	3Ω→0.5Ω

3.3 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 모델 및 결과를 그림 8~11에 나타냈다. 결과를 분석해보면 신규 제작된 2차 발전기 (2K)의 대역폭이 약 20~30Hz로서, 1차 발전기 (5K)의 10~20Hz보다 약 10Hz이상 큰 값을 가져, 빠른 응답특성을 확보하였다. 위상여유 (Phase margin)은 50° 이상으로 시스템 전체 안정성 측면에서 크게 문제되지 않는 것으로 판단된다 (좋은 과도특성을 얻기 위한 위상여유 : 45~60°)^[4].

본 발전기 모델에서 시스템 특성의 주 파라메타는 필드의 저항값 (R_f) 및 인덕턴스값 (L_f)에 크게 좌우되며, Stator 단의 특성은 상대적으로 고주파 부분이어서 특성 변화에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 분석되어졌다.

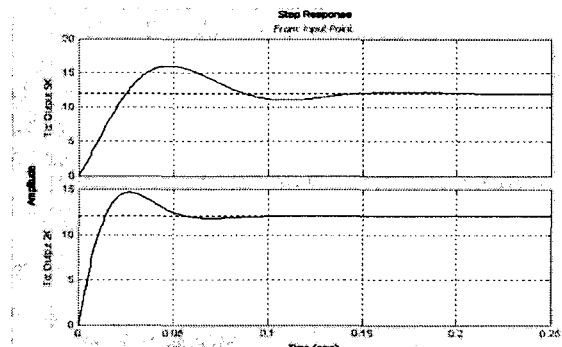


그림 9. 발전기 스텝응답 특성 비교 (부하 10A)
Fig 9. Step Response Compare of Generators

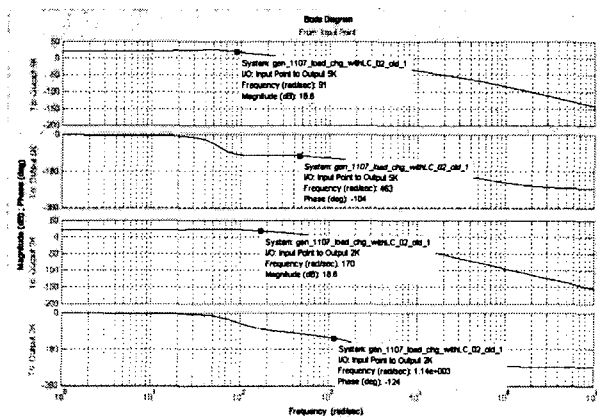


그림 10. 발전기 Bode응답 특성비교 (부하 10A)
Fig 10. Bode Response Compare of Generators

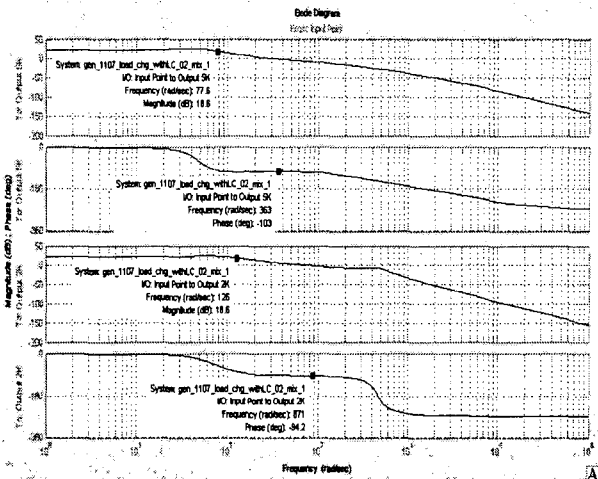


그림 11. 발전기 Bode응답 특성비교 (부하 60A)
Fig 11. Bode Response Compare of Generators

시뮬레이션 모델의 결과 검증을 위해 표 7에 1차발전기와 2차발전기의 과도부하특성에 따른 실험 획득파형과 시뮬레이션 결과를 함께 나타냈다. 과도 회복시 실제 실험에서는 오버슈트(overshoot)가 거의 나타나지 않고 있으나, 시뮬레이션에서는 다소의 오버슈트가 발생하는 것으로 나타나, 이 부분은 추후연구를 통해 규명할 계획이다.

표 7. 모델링 결과 검토
Table 7. Compare of Simulation Result

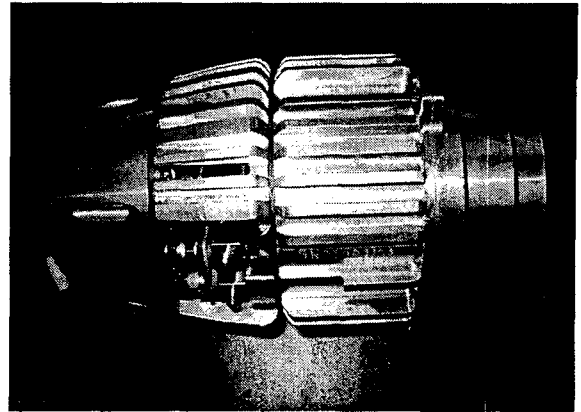
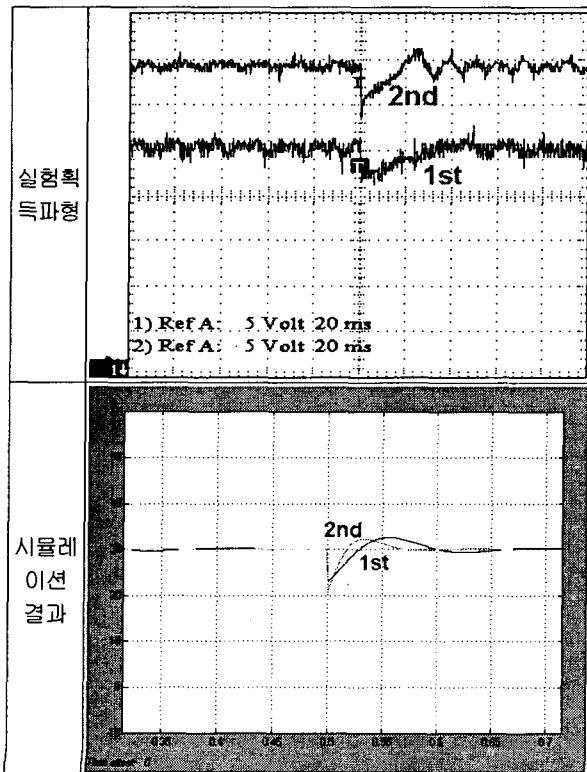


그림 12. 수정 개발된 발전기 형상
Fig 12. Figure of Modified Generator

4. 결 론

본 논문에서는 초소형 항공용 탑재 발전기의 성능 개선 내용을 기술하였으며, 컨트롤 특성의 주요 변수인 필드코일 특성을 개선하여 시스템 대역폭을 증가시켰다. 또한 발전기의 간략화한 제어모델을 수립하여, 발전기의 성능분석에 활용할 수 있게 하였다. 또한 발전기의 제어모델과 부하시스템과의 연계 해석을 가능하게 하여 전체시스템의 운용 안정성을 해석할 수 있을 것으로 기대된다.

추후 연구과제로는 주파수에 따라 변하는 필드코일의 인덕턴스를 적절히 획득하는 방법과 시뮬레이션 결과 나타난 과도회복시의 오버슈트에 대한 결과 개선등을 들 수 있다.

본 논문은 산업자원부의 출연금 등으로 수행한 지역전력 산업 석박사 연구인력 양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

- [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] John Van de Vegte, "Feedback Control Systems," third edition, Prentice Hall International Editions, 1994.
- [4] 김희준, "스위치 모드 파워 서플라이," 성안당, 1989.