

승강압 쇄퍼를 이용한 새로운 발전기 여자 시스템

A New Generator Static Excitation System Using Boost-Buck Chopper

류 광수*, 김의민 • 설 수기**, 박민호**

* 한전 전력 연구원 ** 서울대학교 전기공학과

Abstract - A new generator excitation system using a boost-buck chopper as a kind of static exciters is proposed to overcome the lack of field forcing capability of the bus fed exciter under the input line fault condition. It increases or maintains the generator field current by boosting the field voltage in the case of the input AC line voltage drop during and immediately after a fault. The validity of the proposed excitation system is verified with the computer simulation. The generator stability according to the each difference exciter is tested using a commercial software package-CYME. The simulation results of the stability analysis on the generator with the proposed exciter is better than that of the bus fed exciter. This boost-buck chopper exciter can be simply implemented and controlled by the modern power electronics technology.

1. 서 론

직류 여자기, 교류 여자기 그리고 정지형 여자기는 관련 기술의 발달에 따라 발전기 여자전류를 공급하기 위하여 순차적으로 사용되어 왔으나 직류여자기는 정류(Commutation)이나 브러시(Brush)와 관련된 여려가지 문제와 둑은 응답특성으로 인해서 교류여자기로 대체되어 왔으며, 교류여자기는 응답특성의 상대적인 지연으로 인하여 전압원 정지형 여자기(Bus Fed Static Exciter)로 대체되어 왔다[3]. 전압원 정지형 여자기는 전력전자 및 제어기술의 발달로 시스템이 단순하고 저렴할 뿐 아니라 정비 보수가 용이하고 시간 지연이 없는 초속응 여자가 가능하며 안정도를 향상시키는 장점이 있어 오늘날 여자기의 표준형으로 널리 사용되고 있다[2][3][4][5]. 그러나 전압원 정지형 여자기는 발전기 단자로부터 강압 변압기를 통하여 여자용 입력 전원을 공급받기 때문에 발전기 단자 전압의 변화가 여자기 특성에 직접적으로 영향을 미치는 단점을 보유하고 있다. 정상 운전 상태에서의 단자 전압의 변화는 여자기 전력 변환기의 사이리스터 점화 각을 제어함으로써 발전기 여자전류를 확보할 수 있으나 전력 계통의 선로 고장 등으로 발전기 단자 전압이 저하할 경우에는 발전기 여자전류를 충분히 확보할 수 없는 경우가 발생하게 된다. 이러한 문제를 개선하기 위해서 컴파운드전원 방식의 정지형 여자기(Compound Source Exciter)를 개발하여 사용하고 있으나 그 성능이 정당화되지 못하고 있으며 두 개의 계자권선을 사용하여 한 권선에는 발전기의 단자 전압을 여자기 전원으로 사용하고 다른 계자권선에는 외부 직류 전원을 사용함으로

서 안정도를 향상시키는 노력이 진행되고 있다. 본 논문에서는 현재 가장 널리 사용되고 있는 전압원 정지형 여자기가 갖는 발전기의 안정도 문제를 개선하기 위하여 새로운 승강압 정지형 여자기를 제안 하고자 한다.

2. 제안된 시스템의 구성 및 동작 원리

그림 1은 본 논문에서 제안한 여자기 시스템을 나타내고 있다. 제안된 여자기는 여자기의 초기 형태인 앰플리다인을 이용한 직류 여자기와 유사한 특성을 가지며 Thyristor를 이용한 전압원 정지형 여자기의 결점을 보완한 새로운 여자기 형태이다. 본 논문에서 제안한 여자기는 발전기의 출력 전압을 제어하기 위해서 강압 쇄퍼(Buck-Chopper)를 이용하고 있으며 강압 쇄퍼의 입력으로 이용되는 DC 전압을 일정하게 유지하기 위해서 승압 쇄퍼(Boost-Chopper)를 이용한다.

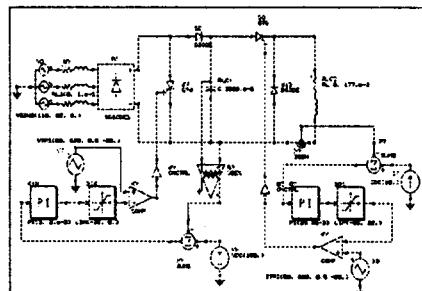


그림 1. 승강압 쇄퍼 여자기.
Fig. 1 Boost-Buck Chopper Exciter

그림 1에서 3상 AC입력 리액터는 강압 쇄퍼의 입력으로 사용되는 DC 전압을 일정하게 유지하기 위해서 사용되며 3상 AC입력의 리액터는 입력측의 누설 변압기를 이용한다. 이러한 누설 변압기는 발전기의 단자 전압을 여자기의 입력으로 사용하기 위해서 사용되어진다. 정상 상태에서 다이오드 브리지와 병렬로 연결된 스위칭 소자는 오프상태를 유지하고 있기 때문에 강압 쇄퍼에 들어가는 입력 전류는 단지 리액터만을 통한다. 그리고 여자기의 입력 전류는 요구되어지는 기준전류에 따라 강압 쇄퍼를 통하여 흐른다. 그러나 만약 선로사고와 같은 상태에서는 승압 쇄퍼의 스위칭 소자는 DC 전압을 일정하게 유지하기 위해서 텐온-오프동작을 하게 된다. 이러한 점이 제안된 여자기가 일반적인 전압원 정지형 여자기보다 우수한 점 중의 하나이다. 또한 기존의 전압원 정지형 여자기는 초기 기동시에도 전류로 인한 기계적인 스트레스가 존재하지만 제안된 여자기는 초기 기동시에 승압 쇄

퍼와 강암초퍼의 적절한 스위칭에 의해서 기존의 전압원 정지형 여자기에 비하여 소프트 기동이 가능하다.

3. 시뮬레이션

본 논문에서는 부록 A에 나와 있는 파라미터를 이용하여 기존의 전압원 정지형 여자기와 승강암초퍼의 단위 스텝 응답 실험을 실시하였다. 발전기 단자전압에 대한 단위 응답실험과 전류 단위 응답실험의 결과는 다르게 나타나지만 만약 계자전류(I_f)응답 실험 결과가 같다면 발전기의 출력전압의 단위응답실험은 $V_t = K_1 \phi = K_2 I_f$ 인 관계를 고려한다면 같아질 것이다.

A. 기존의 전압원 정지형 여자기

그림 2는 컴퓨터 시뮬레이션을 행하기 위한 전압원 정지형 여자기의 회로도를 나타내고 있다. 그리고 그림 3과 4는 6%의 전류 스텝업-다운 모의실험을 행한 결과를 보여주고 있다. 그리고 그림 5는 여자기의 정격 입력전압이 110[V]일 때 전류가 18[A]임을 보여주고 있다.

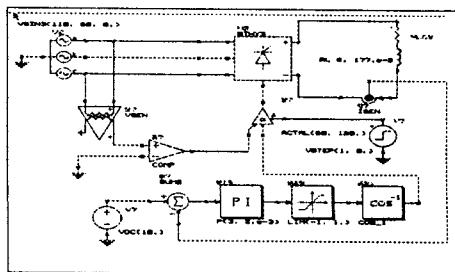


그림 2. 전압원 정지형 여자기의 시뮬레이션 회로도
Fig. 2 Simulation circuit of the bus fed exciter.

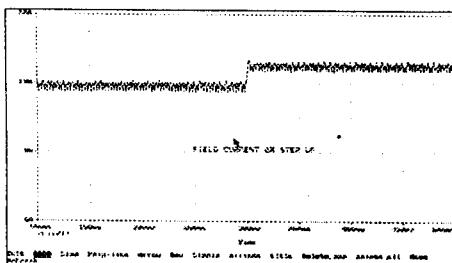


그림 3 전압원 정지형 여자기 6% 전류 스텝업 경우
전류 파형

Fig. 3 Waveform of 6% current step up response of
the bus fed exciter.

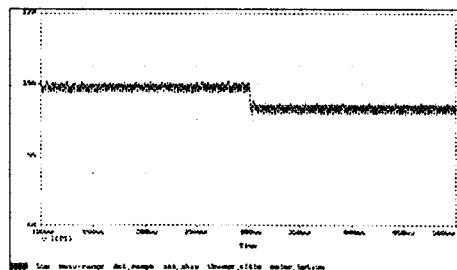


그림 4 전압원 정지형 여자기 6% 전류 스텝다운할
경우 전류 파형

Fig. 4 Waveform of 6% current step down response
test of the bus fed exciter

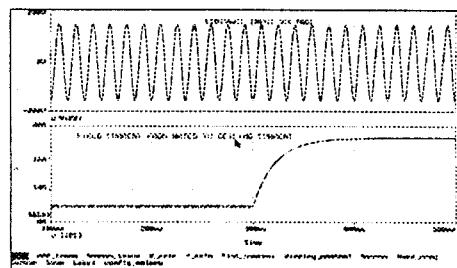


그림 5 전압원 정지형 여자기의 최대 전류
Fig. 5 Ceiling current of the bus fed exciter.

B. 제안된 승강암여자기

그림 6과 7은 제안된 여자기의 6% 전류 스텝업-다운 시뮬레이션을 행한 결과를 보여주고 있다. 시뮬레이션 결과에서 제안된 여자기의 최대전류는 전압원 정지형 여자기와 같다를 것을 알 수 있다. 시뮬레이션을 행한 설계값을 이용할 경우에 입력전압의 승압비율이 대략 184%가 되는 것을 알 수 있다. 따라서 심지어 입력전압이 정격입력전압의 55%로 떨어지는 경우에도 제안된 여자기는 연속적으로 최대전류를 공급할 수 있다. 그럼 8은 일정한 DC전압을 유지하기 위한 최소의 입력전압과 최대전류를 나타내고 있다. 제안된 여자기는 입력전압이 정격입력전압의 55%이하로 떨어질 경우에는 전압강하에 비례적으로 감소한 계자전류를 공급한다.

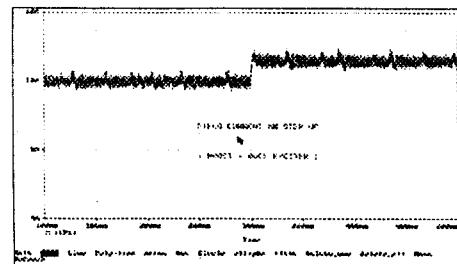


그림 6 승강암 여자기 6% 전류 스텝업한 경우
전류 파형

Fig. 6 Waveform of 6% current step up response of the boost-buck chopper exciter.

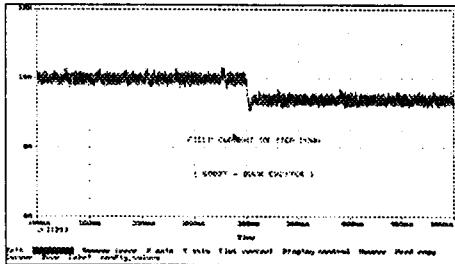


그림 7 승강압 여자기 6% 전류 스텝다운한 경우
전류 파형

Fig. 7 waveform of 6% current step down response of the boost-buck chopper exciter.

그러나 제안된 여자기의 전류 강화 능력은 같은 조건에서 전압원 정지형 여자기보다 우수하다. 다른 입력전압에서 전압원 정지형 여자기와 제안된 여자기의 최대 계자전류는 표 1에 나타나 있다.

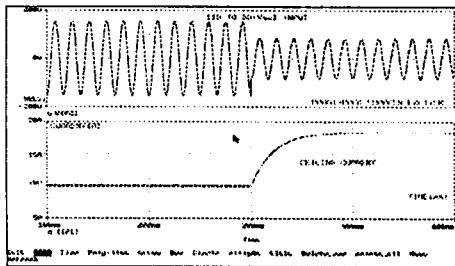


그림 8 최대전류와 일정한 DC전압을 얻기 위한
최대 입력전압

Fig. 8 Minimum input voltage to obtain constant DC link voltage and the ceiling current

표 1. 입력 전압에 따른 계자전류의 시뮬레이션 결과
Table 1 Simulation results of the field current with input volts

Input volts [V]	110	70	60	50	35	20	10
Bus Fed [A]	18	11.3	9.7	8.1	4.8	3.2	1.6
Boost-Buck[A]	18	18	18	15	10.2	6.0	3.0

4. 안정도 시뮬레이션

본 논문에서는 발전기의 안정도를 해석하기 위하여 산업용 전력계통 안정도 해석 프로그램인 CYME를 이용하였다. 전력계통 안정도의 모의실험에 사용한 여자기의 종류는 전압원, 커퍼운드형 그리고 본 논문에서 제안한 승강압 정지형 여자기이다. 전압원과 커퍼운드 전원방식의 정지형 여자기의 모델은 IEEE Std. 421.5-1992[8]에 있는 것을 사용하였으며 승강압 정지형 여자기의 모델은 전압원 정지형 여자기를 기본 모델로 하여

CYMSTAB-UDM[9]을 이용하여 컴퓨터 모의실험으로 해석 결과에 맞게끔 작성하였다. 사용 모델에서 전압원 정지형 여자기와 승강압 정지형 여자기의 차이는 입력전압에 대한 여자전압의 최대 값이 입력전압의 변화에 따라 차이가 있다는 것이다. 승강압 정지형 여자기의 여자전압 최대 값 V_{MAX} 는 컴퓨터 모의 실험 값을 사용하였기 때문에 입력전압이 56% 이상일 경우에는 전압원 정지형 여자기의 최대전류 이상으로 여자전압을 유지할 수 있다. 그럼 9는 CYME에서 DEMO용으로 제공하는 가상의 전력계통도이며 이를 대상으로 두 가지 선로고장의 경우에 대하여 모의 해석하였다.

- 삼상 단락 고장이 OTAWA모선에서 발생하고 10[Hz] 후 해고장이 해소된 경우
- OTAWA 모선에서 임피던스 0.015를 갖는 선간 단락이 발생하였으며 [10Hz]후에 고장이 해소된 경우

발전기 전력각(power angle)의 기준 모선은 OTAWA 모선 7002를 사용하였으며 IAIPU 3 발전소 12번 발전기를 대상으로 여자기 교체 투입하면서 모의해석을 실시하였다.

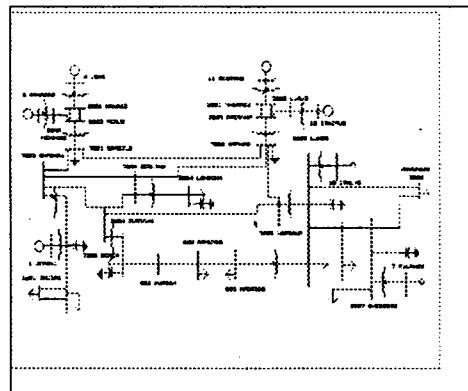


그림 9 안정도 시뮬레이션을 위한 가상 전력계통
Fig. 9 Fictitious network for stability simulation

A. 3상 단락 고장시의 안정도 해석

그림 10은 3상 단락고장에 대하여 승강압 정지형 여자기와 전압원 정지형 여자기의 모의해석 결과를 보이고 있으며 그림 11은 커퍼운드형 여자기와 승강압 정지형 여자기에 대한 것을 나타내고 있다. 그리고 그림 20, 21은 각각에 대한 발전기의 단자전압의 변화 상태를 보이며 본 논문에서 제안된 승강압형의 여자강화(field forcing)능력이 큰 것을 알 수 있다. 짙은 선인 1번 선이 제안된 여자기이고 옅은 선인 2번 선이 전압원 또는 커퍼운드형 여자기에 대한 것으로 승강압형 여자기가 보다 안정도 향상에 기여하는 것을 알 수 있다.

B. 선간단락 고장에 대한 안정도

그림 14와 15는 OTAWA 모선에서 임피던스가 0.015를 갖는 선간단락 발생 시의 안정도 해석 결과를 나타낸 것이다. 그림 16은 전압원 정지형 여자기와 승강압형 여자기에 대하여 그리고 그림17은 승강압형과 컴파운드형 여자기에 대한 안정도 해석 결과를 보인다. 그리고 그림 18, 19는 각각에 대한 발전기 단자 전압의 변화상태를 보이고 있으며 여자기 특성은 승강압형이 높다. 모의 해석 결과는 3상단락 사고 시의 안정도 해석결과와 동일하게 승강압형 정지형 여자기가 안정도에 대한 기억도가 높은 것을 알 수 있다.

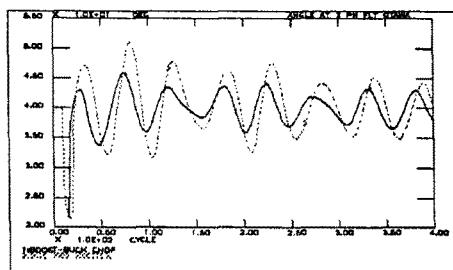


그림 10 3상 고장 단락시의 정지형 여자기와 승강압 여자기의 전력각 과형

Fig. 10 Power angle waveform of the bus fed and the boost-buck excitors on 3 phase short circuits fault.

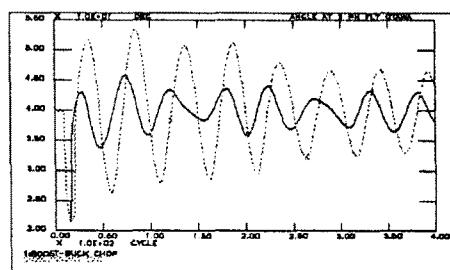


그림 11 3상고장 단락시의 컴파운드 여자기와 승강압 여자기의 전력각 과형

Fig.11 Power angle waveform of the compound source and the boost buck exciter on 3 phase short circuits fault

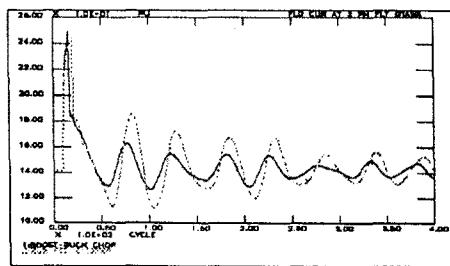


그림 12 3상 고장 단락시의 전압원 정지형 여자기와 승강압 여자기의 계자전류 과형

Fig. 12 Field currents waveform of boost buck exciter and bus fed exciter at 3 phase short circuit fault

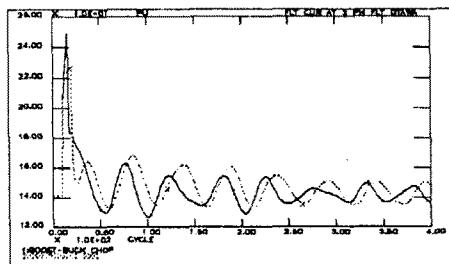


그림 13 3상 고장 단락시의 컴파운드 여자기와 승강압 여자기의 계자전류 과형

Fig. 13 Field currents waveform of the boost-buck and compound source excitors at 3 phase short circuit fault

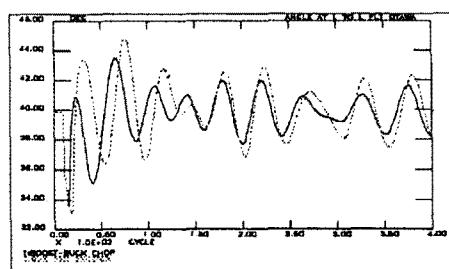


그림 14 선간단락 고장에 대한 전압원 정지형 여자기와 승강압 여자기의 전력각 과형

Fig. 14 Power angle waveform of the bus fed and the boost buck chopper exciter on line to line fault.

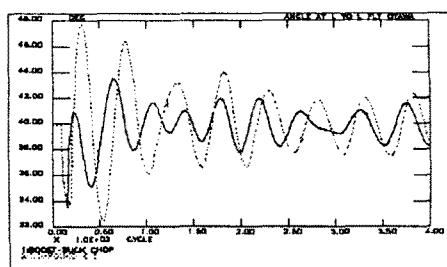


그림 15 선간단락 고장에 대한 컴파운드 여자기와 승강압 여자기의 전력각 과형

Fig. 15 Power angle waveform of the compound source and the boost-buck chopper exciter on line to line fault.

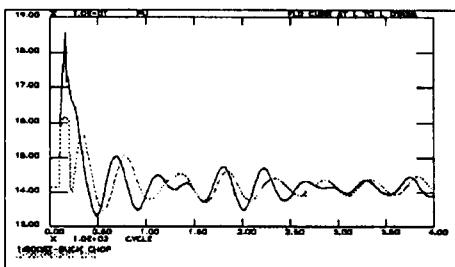


그림 16 컴파운드 여자기와 승강압 여자기의
제자 전류 파형

Fig. 16 Field currents waveform of the boost-buck exciter and the compound source exciter at line to line fault

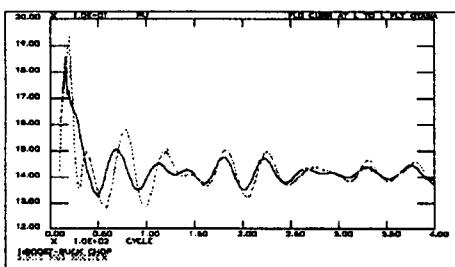


그림 17 선간 단락 고장에 대한 승강압 여자기와 전압원
정지형 여자기의 제자전류 파형

Fig. 17 Field currents waveform of the boost-buck exciter and the bus fed exciter at line to line fault

5. 결론

선로 고장 등에 의한 발전기 단자 전압의 변화로 전압원 정지형 여자기 여자 전원용 전원 전압이 저하할 때 기준의 전압원 여자기와 컴파운드형 여자기에 비하여 안정도를 향상시킬 수 있는 새로운 방식의 승강압 정지형 여자기를 제안하였다. 제안한 승강압 정지형 여자기는 정격 입력 전압의 56%에서도 승압 변환 작용에 의하여 전압원 여자기의 최대 전류와 동일한 여자 전류를 공급 할 수 있다. 제안된 여자기의 응답특성은 시뮬레이션과 측소모델을 이용한 실험을 통하여 검증하였고 가상의 전력계통을 대상으로 전압원 정지형 여자기 컴파운드형 여자기 그리고 승강압 정지형 여자기에 대하여 발전기의 전력각 변화를 기준으로 안정도해석을 실시하였으며 그 결과 본 논문에서 제안한 여자기가 안정도 측면에서 가장 우수함을 확인하였다.

6. 참고 문헌

- [1] ANSI/IEEE Std. 421.1 1986, *An American National Standard/IEEE Standard Definitions for Excitation Systems for Synchronous Machines*. Approved June 13, 1985.

- [2] JIEE Report, *Specification and Characteristics of Synchronous Generator Exciters*, JIEE (Japan) Technical Report No.536, 2, 1995.
- [3] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993, pp. 315-340.
- [4] Brown Boveri Review, NO. 9/10, 1974, *Series Compounding of Self-Excited Synchronous Generator*.
- [5] General Electric, *Power System Stability Lecture Note of 1979/1980 Power System Engineering Course*.
- [6] S. E. Abo-Shady, F. I. Ahmed, A. M. El-Hakim, M. A. Badr, "Analysis of Self-Dual Excited Synchronous Machine(part(I),(II)", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, vol. 3, no. 2, June 1988, pp.305-322.
- [7] IEEE Std. 421.2-1990, *IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems*, Approved May 31, 1990.
- [8] CYME International Inc., *User Guide and Reference Manual(CYMEFLOW,CYMESTAB)*, March, 1995.
- [9] IEEE Std. 421.5 1992, *IEEE recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies*, Approved March 19, 1992.

부 록 A

Generator Capacity	25 KVA	Field Volt	100 V
Generator Volt	220 V	Field Current	10 A
Generator Current	65.6 A	Field Resister	8 Ohm
Phase	3	Field Inductance	177 mH
Exciter AC Input Volts			110 Vac

부 록 B

1) 컴파운드 여자기 파라미터

$$K_A = 120.0 \quad T_A = 0.15 \quad K_E = 1.0 \quad T_E = 0.5$$

$$K_C = 0.65 \quad K_F = 0.02 \quad T_F = 0.56 \quad V_{MAX} = 1.2$$

$$V_{MIN} = -1.2 \quad E_{FDMAX} = 3.5k$$

$$K_P = 1.19 \quad K_I = 1.62$$

2) 전압원 정지형 여자기 파라미터

$$T_R = 0.02 \quad K_A = 200 \quad T_A = 0.0 \quad V_{MAX} = 7.0$$

$$V_{MIN} = -6.4 \quad T_F = 1.0 \quad K_P = 7.0$$

$$T_{A1} = T_{A2} = 0.0$$

3) 승강압 여자기 파라미터

$$T_R = 0.02 \quad K_A = 200 \quad T_A = 0.0 \quad V_{MAX} = 7.0$$

$$V_{MIN} = 0.0 \quad T_F = 1.0 \quad K_P = 14.0$$

$$T_{A1} = T_{A2} = 0.0$$

$$V_{MAX} = K_P \cdot V_T \quad If \quad VT < 0.55$$