

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK



SKRIPSI

**PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC
VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO
DI LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK
MESIN S-1**

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

Disusun Oleh :
HERMAN SUSANTO
NIM : 02.12.064

MARET 2007

CHINESE JAPANESE INDIA CHINA
INDONESIA PHILIPPINES SINGAPORE
P-2 CENTERED AGAINST MADAGASCAR
PORTUGAL PORTUGUESE PORTUGAL BRAZIL

SCOTTISH

SCOTTISH NATIONALIST HAVE INDEPENDENCE
THEIR OWN ISLANDS (NORTH) SCOTTISH NATIONALIST
CONSTITUTION SCOTTISH NATIONAL CONVENTION ALSO
SCOTTISH NATIONAL INDEPENDENCE REFERENDUM AS
P-2 UNION

SCOTTISH INDEPENDENCE REFERENDUM

SCOTTISH INDEPENDENCE
SCOTTISH INDEPENDENCE
SCOTTISH INDEPENDENCE

SCOTTISH INDEPENDENCE

LEMBAR PERSETUJUAN

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK MESIN S-1 INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

SKRIPSI

*Disusun Dan Diajukan Untuk Memenuhi Persyaratan Guna Mencapai Gelar
Sarjana Teknik Elektro Strata Satu (S-I)*

Disusun Oleh :
HERMAN SUSANTO
NIM : 02.12.064



Mengetahui,
Sarjana Jurusan Teknik Elektro S-1
Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
NIP. Y. 103 950 0274



Diperiksa dan Disetujui,
Dosen Pembimbing I

Ir. H. Almizan Abdullah, MSEE
NIP. Y. 103 900 0208

Diperiksa dan Disetujui,
Dosen Pembimbing II

Ir. Widodo Pudji M., MT
NIP. Y. 102 870 0171

KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

ABSTRAKSI

JUDUL : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI LABORATORIUM JURUSAN TEKNIK MESIN S-1 INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

Disusun Oleh : Herman Susanto

**Dosen Pembimbing : 1. Ir. H. Almizan Abdullah, MSEE
2. Ir. Widodo Pudji M, MT**

Kata kunci : *Automatic Voltage Regulator (AVR), PI Controller , PLTMH ITN Malang.*

Pada laboratorium lapangan pembangkit listrik tenaga mikrohidro jurusan Teknik Mesin S-1 Institut Teknologi Nasional Malang terdapat sebuah turbin pelton yang akan dimanfaatkan untuk melengkapi sebuah pembangkit listrik mikrohidro yang selanjutnya disebut PLTMH ITN Malang.

Sistem pengaturan tegangan otomatis pada Alternator dilakukan dengan pengaturan arus eksitasi dalam hal mengimbangi perubahan arus beban terhadap perubahan tegangan terminal, sehingga arus eksitasi diubah sesuai dengan perubahan tegangan.

Pada PLTMH ITN Malang untuk menjaga agar tegangan keluaran Alternator tetap stabil yaitu 12 volt DC maka diperlukan sebuah AVR yang menggunakan PWM dan PI kontroler untuk menjaga sistem agar tetap stabil.

KATA PENGANTAR

Dengan mengucapkan puji syukur atas kehadirat Allah SWT, karena atas berkat rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi tersebut tepat pada waktunya. Penyusunan skripsi ini dimaksudkan untuk memenuhi syarat dalam menyelesaikan studi di Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Nasional Malang. Tak lupa penulis mengucapkan rasa terima kasih yang sebesar-besarnya kepada pihak – pihak yang telah membantu dalam proses penyelesaian skripsi ini. Ucapan terima kasih penulis tujuhan kepada yang terhormat :

1. Bapak Ir. F. Yudi Limpraptono, MT, selaku ketua jurusan Teknik Elektro.
2. Bapak Ir. Almizan Abdullah, MSEE, selaku Dosen Pembimbing yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan mengarahkan penulis selama proses penyusunan skripsi.
3. Bapak Ir. Widodo Pudji M, MT Selaku Dosen Pembimbing Pendamping yang telah meluangkan waktunya untuk membimbing dan mengarahkan penulis selama proses penyusunan skripsi.
4. Rekan – rekan Jurusan Teknik Elektro angkatan tahun 1997, tahun 1998, dan tahun 2002.

Meskipun telah dikaji berulang – ulang dan dikerjakan dengan sungguh-sungguh, namun penulis menyadari bahwa skripsi ini jauh dari sempurna. Sehingga kritik dan saran, penulis terima dengan tangan terbuka. Akhir kata semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi kita semua.

Malang, Maret 2007

PENULIS

DAFTAR ISI

	Halaman
LEMBAR PERSETUJUAN	i
ABTRAKSI	ii
KATA PENGANTAR.....	iii
DAFTAR ISI.....	iv
DAFTAR GAMBAR.....	viii
DAFTAR TABEL.....	x
BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian.....	3
1.4 Batasan Masalah.....	3
1.5 Metodologi Penelitian	4
1.6 Sistematika Pembahasan	5
BAB II LANDASAN TEORI	
2.1 Sistem Pembangkit Listrik Tenaga Mikro Hidro	6
2.1.1 Hidrologi	7
2.1.1.1 Debit Sungai.....	7
2.1.1.2 Debit Andalan.....	7
2.1.2 Bangunan Sipil	8
2.1.2.1 Bendung.....	8
2.1.2.2 Intake	9

2.1.2.3 Saluran Pembawa	9
2.1.2.4 Bak Penenang	10
2.1.2.5 Pipa Pesat	11
2.1.2.6 Rumah Pembangkit	11
2.2 Komponen – komponen PLTMH.....	12
2.2.1 Turbin Pelton Mikro.....	12
2.2.2 Nosel.....	13
2.2.3 Generator Sinkron	14
2.2.3.1 Prinsip kerja Generator	14
2.2.3.2 Reaksi Jangkar	15
2.2.3.3 Alternator tanpa beban	15
2.2.3.2 Alternator berbeban.....	16
2.2.3.2 Rangkaian Penyearah Alternator.....	17
2.3 Sistem Pengendalian Proses	18
2.3.1 Prinsip Pengendalian Proses.....	18
2.3.2 Pengendalian Proporsional	18
2.3.3 Pengendalian Integral	20
2.3.4 Pengendalian Proporsional plus Integral (PI).....	21
2.4 Penguatan	22
2.5 AVR (<i>Automatic Voltage Regulator</i>)	22
2.6 PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>).....	23
2.7 IC Timer 555	24
2.8 <i>Operational Amplifier</i>	25

2.8.1 IC 741	26
2.8.1 IC 358	26
2.9.1 IC 324.....	27

BAB III PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AVR DENGAN PI CONTROLLER PADA PLTMH ITN MALANG

3.1 PLTMH ITN Malang.....	28
3.2 Data pada PLTMH ITN Malang	30
3.3 Diagram Alir PLTMH.....	31
3.4 Perancangan dan Pembuatan AVR.....	32
3.4.1 Rangkaian Astable.....	33
3.4.2 Rangkaian Komparator.....	36
3.4.3 Rangkaian PWM	36
3.4.4 Rangkaian Driver Alternator	38
3.4.5 Setpoint.....	39
3.4.6 Rangkaian Deferensial	39
3.4.7 Rangakaian Bias	40
3.4.8 Rangakaian Proporsional.....	41
3.4.9 Rangakaian Integral.....	41
3.4.10 Rangkaian PI Kontroler.....	42
3.5 Rangkaian AVR dengan PI Kontroler.....	43

BAB IV ANALISA DAN EVALUASI AVR DENGAN PI KONTROLLER PADA PLTMH ITN MALANG

4.1 pengujian dan Pengukuran AVR.....	44
4.2 Hasil Pengujian dan Pengukuran AVR	45
4.2.1 Hasil Pengujian AVR terhadap Tegangan Eksitasi dan Arus Eksitasi.....	45
4.2.2 Hasil Pengujian AVR terhadap Tegangan dan Arus Keluaran Alternator.....	47
4.3 Analisa Pengujian dan Pengukuran AVR	51

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan	52
5.2 Saran	53

DAFTAR PUSTAKA

LAMPIRAN

DAFTAR GAMBAR

Gambar		Halaman
2.1	Skema Mikrohidro.....	8
2.2	Intake	9
2.3	Saluran Pembawa	10
2.4	Bak Penenang.....	10
2.5	Pipa Pesat	11
2.6	Turbin Pelton.....	12
2.7	Penampang Nosel	13
2.8	Alternator.....	14
2.9	Kurva Pemagnetan Alternator tanpa beban.....	16
2.10	Rangkaian Penyearah Alternator.....	17
2.11	Pespon pengendali P.....	20
2.12	Diagram Blok Kontroler PI	21
2.13	Pulsa PWM dengan Duty Cycle 50 %.....	24
2.14	Diagram Pin IC 555	24
2.15	Rangkaian Dasar OP- Amp	25
2.16	Diagram Pin IC 741.....	26
2.17	Diagram Pin IC 358.....	26
2.18	Kemasan IC 324	27
3.1	Diagram Sistem PLTMH ITN Malang.....	28
3.2	Diagram Blok Perancangan AVR	32
3.3	Rangakaian Astable	34

3.4	Bentuk Glb. Segitiga Rangkaian Pembangkit tegangan DC	35
3.5	Rangkaian Skematik IC 358 358.....	36
3.6	Bentuk Glb. Segitiga Keluaran Rangkaian Komparator	36
3.7	Rangkaian PWM	37
3.8	Pulsa PWM Dengan Duty Cycle 50 %.....	38
3.9	Rangkaian Driver Alternator.....	38
3.10	Rangkaian Set Point	39
3.11	Rangkaian Deferensial	39
3.12	Rangkaian Penjumlahah.....	40
3.13	Rangkaian Proporsional	39
3.14	Rangkaian Integral	42
3.15	Rangkaian Proporsional plus Integral	42
3.16	Rangkaian AVR Proporsional plus Integral	43
4.1	Rangkaian AVR dengan PI kontroler.....	44
4.2	Skema Pengukuran AVR terhadap Tegangan dan Arus Eksitasi	45
4.3	Skema Pengukuran AVR terhadap Tegangan dan Arus Keluaran Alternator.....	48

DAFTAR TABEL

Tabel		Halaman
4.1	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan dan Arus Eksitasi	46
4.2	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Eksitasi.....	46
4.3	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Eksitasi Pada PLTMH ITN Malang	47
4.4	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Eksitasi Pada PLTMH ITN Malang	47
4.5	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Keluaran Alternator	49
4.6	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Keluaran Alternator	49
4.7	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Keluaran Alternator Pada PLTMH ITN Malang	50
4.8	Hasil Pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Keluaran Alternator Pada PLTMH ITN Malang	50

BAB I

P E N D A H U L U A N

1.1 Latar Belakang

Sistem tenaga listrik terdiri atas sejumlah unit-unit pembangkit yang letaknya terpisah dan dihubungkan satu sama lainnya dalam melayani beban pada daerah pelayanan melalui sistem jaringan tenaga listrik yang terinterkoneksi. Stasiun pembangkit umumnya terdiri lebih dari satu unit pembangkit, tergantung pada aspek teknis dan ekonomis setempat untuk mendukung pengoperasian yang optimal.

Pada laboratorium lapangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro jurusan Teknik Mesin S-1 Institut Teknologi Nasional Malang terdapat sebuah turbin pelton yang akan dimanfaatkan untuk melengkapi sebuah pembangkit mikrohidro yang selanjutnya disebut PLTMH ITN Malang. Penggunaan kincir angin untuk menghasilkan energi listrik mempunyai kendala yaitu, mengingat energi angin yang tidak tetap. Untuk mengatasi kendala tersebut, maka ada suatu pemikiran memanfaatkan energi angin tersebut untuk memompa air ke sebuah tandon air yang terletak di suatu ketinggian. Dengan demikian air ditampung terlebih dulu dalam tandon, yang dinamakan tandon atas, untuk selanjutnya dialirkan ke turbin air yang menjalankan Alternator sesuai dengan kebutuhan beban.

Namun, karena sistem bagian depan (*front end*) : pompa – kincir angin belum direalisasikan, maka dalam skripsi ini hanya akan di bahas sistem bagian

belakang (*rear end*) : Tandon – Turbin – Alternator – AVR – Inverter – beban – SCADA, yang terbagi atas 3 pokok bahasan, yaitu :

- a. Perancangan dan pembuatan AVR dengan pengendali PI
- b. Perancangan dan pembuatan Inverter
- c. Perencanaan dan penerapan SCADA

Dalam Skripsi ini dibahas tentang perancangan dan pembuatan AVR dengan pengendali PI (Proporsional plus Integral) pada PLTMH ITN Malang yang berfungsi mengatur besarnya arus eksitasi, memperbaiki keluaran tegangan dari Alternator agar dihasilkan tegangan yang rata +12 volt DC sehingga dapat memperpanjang masa pemakaian inverter, serta mempercepat tanggapan output sistem mendekati harga acuan dan menghilangkan steady state error.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang diatas, maka permasalahan yang timbul adalah:

Dapatkan dibuat AVR (*Automatic Voltage Regulator*) dengan kontroler PI untuk diterapkan pada PLTMH dalam mengatur arus eksitasi pada Alternator. Sehubungan dengan hal itu, maka skripsi ini diberi judul :

**“PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE
REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER
PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKRO HIDRO
DI LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK MESIN S-1
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG”**

1.3 Tujuan Penelitian

Merancang dan membuat AVR dengan pengendali PI dan mengaplikasikannya pada PLTMH di laboratorium lapangan jurusan teknik mesin S-1 ITN Malang.

1.4 Batasan Masalah

Agar pembahasan skripsi ini terarah sesuai dengan tujuan, perlu ditetapkan batasan masalah sebagai berikut :

- 1) Hanya merancang dan membuat AVR dengan pengendali PI.
- 2) Sistem yang ditinjau adalah PLTMH di laboratorium teknik mesin S-1 ITN Malang.
- 3) Tidak membahas sistem pengendali lainnya..
- 4) Tidak membahas tentang pemompaan air dari tandon bawah ke tandon atas.

1.5 Metodologi Penelitian

Dalam penyusunan skripsi ini pembahasan dilakukan dengan langkah-langkah sebagai berikut :

1. Studi Literatur

Yaitu mempelajari teori penunjang tentang *Automatic Voltage Regulator* (AVR), kontroler PI dan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro.

2. Perencanaan dan pembuatan *Automatic Voltage Regulator* (AVR) dengan Pengendali PI.

3. Studi lapangan

Yaitu melakukan pengamatan disertai dengan pengumpulan data-data pada tempat yang terkait.

4. Melakukan evaluasi terhadap AVR dengan kontroler PI pada PLTMH ITN Malang.

5. Menarik kesimpulan dari hasil penelitian.

1.6 Sistematika Penulisan

Penulisan skripsi ini dibagi menjadi lima Bab, dimana secara garis besarnya adalah sebagai berikut :

BAB I : Menguraikan tentang latar belakang masalah, rumusan masalah, batasan masalah, tujuan penelitian, metodologi penelitian dan sistematika penulisan.

BAB II : Membahas tentang teori dasar PLTMH, AVR, kontroler PI dan komponen-komponen penting dari PLTMH.

BAB III : Berisikan tentang pembahasan perancangan dan pembuatan *Automatic Voltage Regulator (AVR)* yang digunakan pada PLTMH ITN Malang.

BAB IV : Berisikan analisa dan evaluasi *Automatic Voltage Regulator (AVR)* dengan kontroler PI pada PLTMH ITN Malang.

BAB V : Berisikan kesimpulan dari hasil penelitian skripsi ini beserta saran-saran sehubungan hasil penelitian ini.

BAB II

LANDASAN TEORI

2.1. Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH)

Mikrohidro adalah istilah yang digunakan untuk instalasi pembangkit listrik yang menggunakan energi air. Kondisi air yang bisa dimanfaatkan sebagai sumber daya (*resources*) penghasil listrik adalah memiliki kapasitas aliran dan ketinggian tertentu dari instalasi. Semakin besar kapasitas aliran maupun ketinggiannya dari instalasi maka semakin besar energi yang bisa dimanfaatkan untuk menghasilkan energi listrik.

Mikrohidro dibangun berdasarkan adanya air yang mengalir di suatu daerah dengan kapasitas dan ketinggian yang memadai. Istilah kapasitas mengacu kepada jumlah volume aliran air persatuan waktu (*flow capacity*) sedangkan beda ketinggian daerah aliran sampai ke instalasi dikenal dengan istilah *head*. Mikrohidro juga dikenal sebagai *white resources*, dikatakan demikian karena dulunya pembangkit listrik menggunakan batu bara sebagai sumber energi utamanya yang mana batu bara tersebut berwarna hitam dan pada pengembangan selanjutnya menggunakan air sebagai sumber energi utamanya. Di mana air berwarna jernih dan ramah lingkungan., sehingga mikrohidro disebut *white resource*.

2.1.1. Hidrologi

2.1.1.1 Debit sungai

Debit sungai merupakan data pokok untuk perencanaan pembangkit tenaga listrik dengan memanfaatkan tenaga potensial air, sehingga debit harus diukur secara teliti dan dalam waktu yang sepanjang mungkin. Pengukuran debit sungai didasarkan pada debit andalan yakni pengukuran aliran sungai sepanjang tahun sehingga diperoleh data statistik debit sungai maksimum maupun minimum.

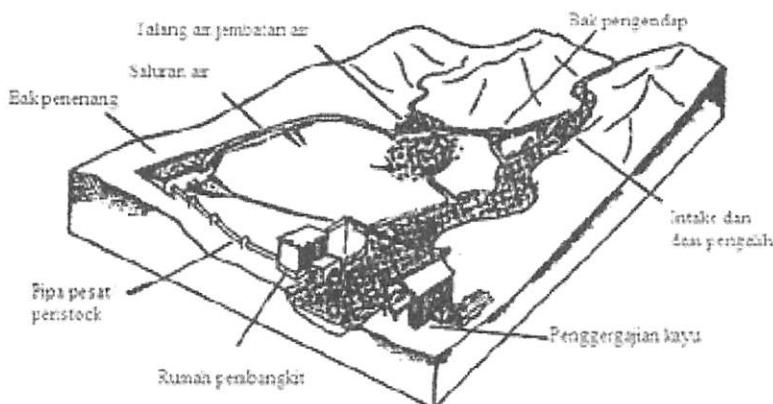
2.1.1.2 Debit andalan

Duration curve adalah suatu grafik yang memperlihatkan debit sungai selama beberapa waktu tertentu dalam satu tahun, debit ini terdapat di dalam sungai. Debit minimum terdapat selama setahun penuh, sedangkan debit maksimum hanya terdapat selama beberapa jam. *Duration curve* digambarkan dari data-data debit, sekurang-kurangnya selama 10 tahun, agar dapat memberikan informasi yang bisa digunakan.

Untuk menentukan besarnya debit sungai yang diharapkan dalam rangka merencanakan kapasitas turbin serta bangunan sipil lainnya yang diperlukan adalah suatu lengkung debit / *duration curve*, dari lengkung debit ini dapat diketahui sifat dari sungai tersebut, sehingga dapat diperkirakan besarnya debit andalan yang diharapkan.

2.1.2. Bangunan Sipil

Bangunan sipil yang direncanakan pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro meliputi : Bendung, *Intake*, saluran pembawa, bak penenang , pipa pesat (*penstock*), dan *power house*.



Gambar 2.1
Skema Mikro Hidro

(Sumber : www.Mikrohidro.Net)

2.1.2.1 Bendung

Bendung adalah bangunan yang berfungsi untuk meninggikan elevasi muka air di sungai sehingga air dapat mengalir ke arah *intake* untuk selanjutnya dialirkan ke arah saluran pembawa khususnya pada musim kemarau. Bendung dilengkapi dengan pintu air penguras yang berfungsi mengendalikan jumlah air yang masuk ke dalam *intake* sekaligus sebagai pintu penguras untuk menggelontorkan endapan-endapan lumut (sendimen) yang cepat atau lambat akan terkumpul di hulu bendung. Pada musim hujan khususnya musim banjir, pintu bendung harus dalam keadaan terbuka agar tekanan yang menimpa badan bendung dapat dikurangi.

2.1.2.2 *Intake*

Intake adalah bangunan disisi kiri atau kanan bendung yang berfungsi untuk mengalirkan air ke saluran pembawa sesuai debit yang telah direncanakan. *Intake* dirancang agar selalu mampu mengalirkan air sesuai dengan debit perencanaan pada kondisi debit sungai yang bagaimanapun. Pada *intake* dilengkapi saringan kasar untuk mencegah sampah dan kayu-kayu besar masuk ke dalam saluran pembawa.



Gambar 2.2

Intake pada suatu Mikro Hidro

(Sumber : www.Mikrohidro.Net)

2.1.2.3 Saluran Pembawa (*Headrace*)

Merupakan saluran yang berfungsi untuk mengalirkan air dari *intake* ke bak penenang sehingga pada bak penenang selalu akan diperoleh suplai air sesuai dengan debit yang telah direncanakan.



Gambar 2.3
Saluran pembawa

(Sumber : www.Mikrohidro.Net)

2.1.2.4 Bak Penenang (*Headtank*)

Bak penenang berfungsi untuk mengurangi kecepatan air yang masuk dari saluran, sehingga turbulensi air pada saat masuk ke dalam penstock berkurang untuk dapat membangkitkan daya yang optimal. Pada bak penenang dilengkapi dengan saringan (*trash rack*) dimaksudkan agar air yang masuk ke dalam turbin bebas dari benda-benda keras yang dapat merusak *runner* turbin.



Gambar 2.4
Bak Penenang (*Headtank*)

(Sumber : www.Mikrohidro.Net)

2.1.2.5 Pipa Pesat (*penstock*)

Merupakan sebuah pipa yang menghubungkan antara bak penenang dan turbin yang berada di rumah pembangkit.



Gambar 2.5

Pipa Pesat (*penstock*)

(Sumber : www.Mikrohidro.Net)

2.1.2.6 Rumah Pembangkit (*Power House*)

Rumah pembangkit (*Power House*) berfungsi untuk melindungi alat-alat pembangkit serta merupakan pusat kontrol dari sistem pembangkit. Diluar rumah pembangkit terdapat *ballast tank*. *Ballast tank* diisi dengan air untuk meyerap panas yang dihasilkan oleh *ballast load* (elemen pemanas air). Dibawah rumah pembangkit terdapat saluran buang (*tail race*) yang berfungsi untuk mengalirkan air kembali ke saluran setelah melalui turbin.

2.2 Komponen - komponen PLTMH

2.2.1 Turbin Pelton Mikro

Turbin pelton mikro adalah suatu instalasi turbin pelton yang kapasitasnya jauh lebih kecil dari pada turbin pelton yang digunakan pada pembangkit tenaga listrik dengan skala yang besar. Mekanisme dasar dari turbin pelton mikro pada dasarnya sama dengan turbin pelton kapasitas besar. Dalam turbin pelton mikro sebagai pengganti air jatuh, perancang menggunakan pompa sentrifugal untuk kepentingan eksperimen.

Pada turbin mikro terdapat *runner* dan sudu, *runner* dari sebuah turbin pelton merupakan sebuah piringan melengkung yang dipasang pada poros horizontal. Pada bagian keliling luar dan runner dipasang sejumlah sudu secara sama (*uniform*). Sudu dipasang melingkari roda turbin, sehingga sudu tersebut bergerak bersama-sama dengan roda turbin yang disebut dengan sudu gerak.



Gambar 2.6

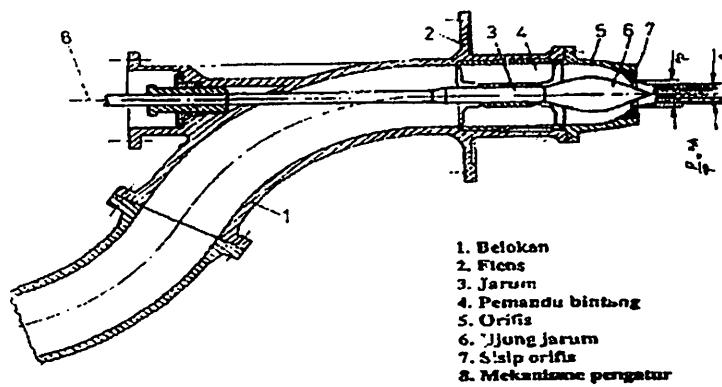
Turbin Pelton

(Sumber :Foto Turbin Pelton Mikro, T. Mesin S-1 ITN Malang)

2.2.2 Nosel

Nosel merupakan mekanisme pancaran berbentuk melengkung yang mengarahkan air sesuai dengan arah aliran yang direncanakan dan mengatur aliran air. Aliran air dalam bentuk jet menumbuk *bucket* (mangkok). Sebuah jarum mekanis di bagian dalam nosel berfungsi untuk mengatur jumlah air yang dialirkan. Gerakan dari jarum dapat diatur dengan tangan atau secara otomatis, sesuai dengan keperluan yang dikehendaki.

Turbin Pelton dimungkinkan konstruksi nosel lebih dari sebuah. Pada poros mendatar dilengkapi satu atau dua buah nosel, sedang yang berporos tegak mempunyai sampai enam buah nosel untuk mencapai putaran tertentu.



Gambar 2.7

Penampang Nosel

(Sumber : Markus Einsenring, M. Edi Sunarto, Turbin Pelton Mikro, hal. 18)

2.2.3 Generator Sinkron

2.2.3.1 Prinsip kerja Generator

Generator yang digunakan dalam penelitian ini adalah jenis Alternator, Alternator mempunyai kumparan jangkar pada stator dan kumparan medan pada rotor. Untuk menghasilkan fluks pada kumparan medan, arus searah (dc) dialirkkan ke rotor melalui cincin.

Prinsip kerja alternator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnet, dari hukum Faraday tentang ggl (gaya gerak listrik):

$$e = \frac{d\Phi}{dt}$$

$$e = \frac{B \cdot l \cdot ds}{dt}, \quad v = \frac{ds}{dt}$$

$$e = B \cdot l \cdot v$$

Dimana :

e = tegangan sesaat yang dibangkitkan

B = kerapatan fluks yang melewati konduktor

l = panjang konduktor yang dipotong oleh fluks

v = kecepatan konduktor



Gambar 2.8
Alternator

Apabila kumparan jangkar dihubungkan dengan sumber tegangan akan ditimbulkan medan putar pada stator. Kutub medan rotor yang diberi penguatan arus searah mendapat tarikan dari kutub medan putar stator hingga turut berputar dengan kecepatan yang sama (sinkron).

2.2.3.2 Reaksi jangkar

Apabila Alternator melayani beban, maka pada kumparan jangkar stator mengalir arus, dan arus ini menimbulkan fluks jangkar. Fluks jangkar yang ditimbulkan arus (ϕ_A) akan berinteraksi dengan yang dihasilkan kumparan medan rotor (ϕ_F), sehingga menghasilkan fluks resultante (ϕ_R).

$$\phi_R = \phi_F + \phi_A; \text{ jumlah secara vektor.}$$

Adanya interaksi ini dikenal sebagai reaksi jangkar.

2.2.3.3 Alternator tanpa beban

Dengan memutar alternator pada kecepatan sinkron dan rotor diberi arus medan (I_f), tegangan (E_0) akan terinduksi pada kumparan jangkar stator.

$$E_0 = c.n.\phi$$

Dimana :

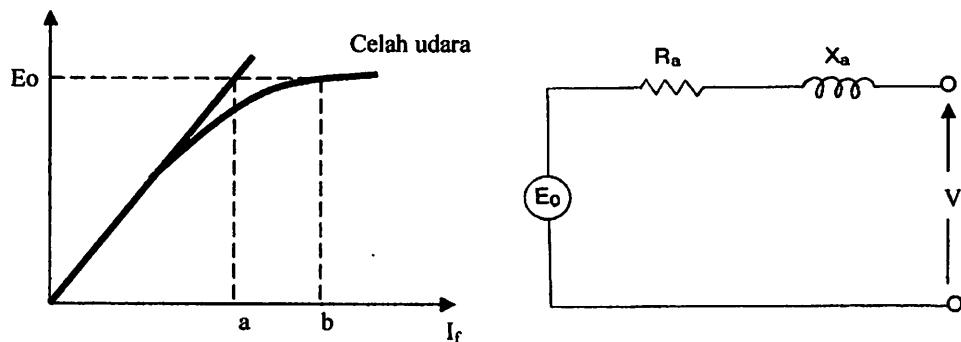
c = konstanta mesin tergantung pada jumlah belitan dan jumlah kutub

n = putaran Alternator

ϕ = fluksi yang dihasilkan oleh kumparan medan (sebanding dengan I_f).

Dalam keadaan tanpa beban arus jangkar tidak mengalir pada stator, karenanya tidak terdapat pengaruh reaksi jangkar. Fluks hanya dihasilkan oleh arus medan (I_f). Apabila arus medan (I_f) diubah-ubah harganya, akan diperoleh

harga E_0 seperti yang terlihat pada kurva pemagnetan gambar 2.9. Pada celah udara kurva pemagnetan merupakan garis lurus.



Gambar 2.9

Kurva pemagnetan Alternator tanpa beban

(Sumber : Zuhai, Dasar Tenaga Listrik, hal 94)

Dimana :

ab = tambahan arus medan yang diperlukan untuk daerah jenuh

R_a = tahanan stator

X_a = Fluks bocor

E_0 = V (keadaan tanpa beban)

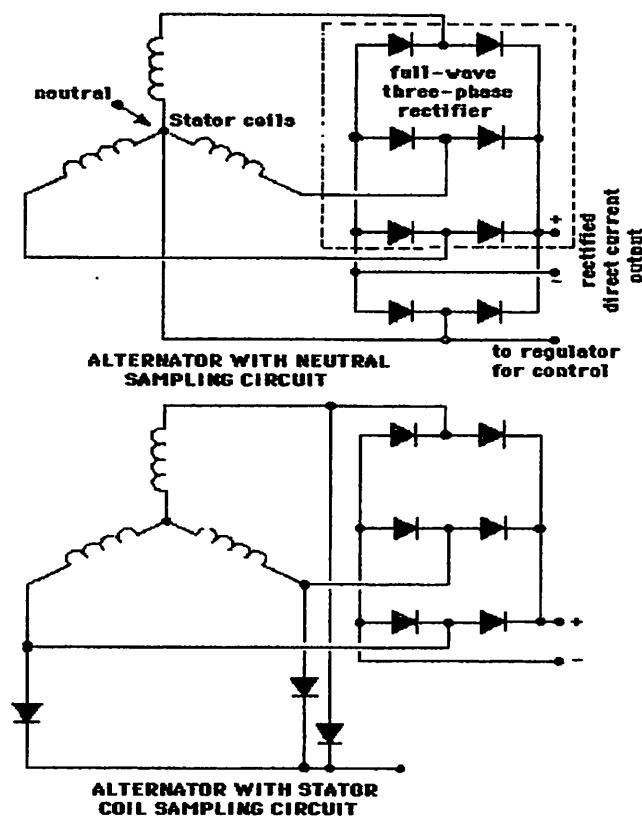
2.2.3.4 Alternator berbeban

Dalam keadaan berbeban arus jangkar akan mengalir dan mengakibatkan terjadinya reaksi jangkar. Reaksi jangkar bersifat reaktif karena itu dinyatakan sebagai reaktansi dan disebut reaktansi pemagnetan (X_m). Reaktansi pemagnetan (X_m) ini bersama-sama dengan reaktansi fluks bocor (X_a) dikenal sebagai reaktansi sinkron (X_s).

$$E = V + I \cdot R_a + j \cdot I \cdot X_s ; X_s = X_m + X_a$$

2.2.3.5 Rangkaian Penyearah Alternator

Pada dasarnya Alternator seperti pada mobil mempunyai kontruksi dengan enam pasang kutub yang masing – masing bejarak 60 derajat, yang menghasilkan tegangan AC tiga fasa. Untuk menghasilkan tegangan DC maka diperlukan rangkaian penyearah tiga fasa, seperti pada gambar 2.5



Gambar 2.10

Rangkaian Penyearah Alternator

(Sumber : <http://members.1stconnect.com/anozira/>)

2.3 Sistem Pengendalian Proses

Sistem Pengendalian merupakan gabungan kerja alat-alat pengendalian otomatis, sedangkan peralatan yang membentuk sistem pengendalian disebut instrumentasi pengendalian proses.

2.3.1 Prinsip-prinsip Pengendalian Proses

Di dalam mengendalikan proses terdapat empat langkah yang perlu ditempuh yaitu:

1. Mengukur
2. Membandingkan
3. Menghitung
4. Mengoreksi

Semua langkah ini dikerjakan otomatis oleh instrumen, sedangkan operator hanya menentukan besarnya set point. Sistem pengendalian ini disebut dengan sistem pengendalian otomatis (*automatic control system*). Keempat tahap tahap pengendaliannya sepenuhnya dilakukan oleh instrumentasi. Mata rantai pengendaliannya kemudian disebut mata rantai tertutup, dan sistemnya disebut juga sistem pengendalian tertutup (*closed loop*).

2.3.2 Pengendalian Proporsional

Pengendalian proporsional merupakan unit kontrol yang paling popular dan banyak digunakan dalam kontrol automatik, yang mana kontroler proposional memiliki keluaran yang sebanding/proposisional dengan besarnya sinyal kesalahan (selisih antara besaran yang diinginkan dengan harga aktualnya).

Persamaan Pengendali Proporsional sebagai berikut:

$$O = Gc \cdot e + B$$

Dimana:

O = Besarnya output

Gc = Gain Controlled

e = error

B = Bias

Sepintas istilah Gain (Gc) unit control proporsional memberikan kesan bahwa ada penguatan atau pembesaran sinyal. Padahal gain bias berupa bilangan bulat, pecahan bahkan berharga negative. Sehingga output bias lebih kecil dari input, sehingga dalam praktik istilah gain jarang dipakai dan yang lazim adalah Proporsional Band (PB).

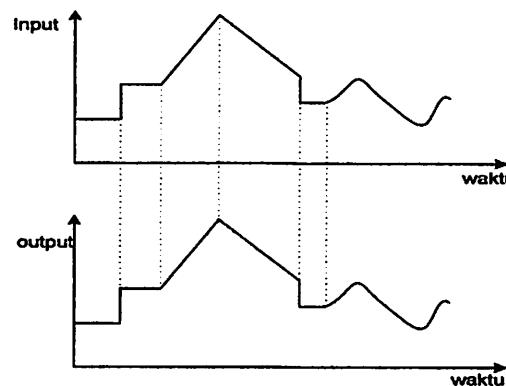
Reaksi Pengendali proporsional sangat tergantung pada besarnya penyetelan PB dimana :

$$Gc = \frac{100\%}{PB}$$

PB tidak boleh dibuat terlalu kecil. Karena semakin kecil PB maka GC akan semakin besar. Kedua besaran ini begitu pentingnya karena memberikan pengaruh pada kestabilan sistem.

Kelemahan Pengendali Proporsional adalah selalu meninggalkan error yang kemudian lazim disebut *offset*. Besarnya Bias diperlukan untuk mempertahankan output pada waktu error sama dengan nol. Salah satu cara untuk menghilangkan offset adalah dengan menyetel bias agar sedekat mungkin dengan load.

Output P selalu mengikuti Inputnya, naik turun input diikuti secara langsung oleh output .



Gambar 2.11
Respon Pengendali P

2.3.3 Pengendalian Integral

Pengendali ini mempunyai fungsi memperbaiki output dari kontroler P yang masih mempunyai error. Oleh karena itu, untuk menghilangkan *offset* diperlukan pengendali Integral. Sifat inilah yang dimiliki oleh pengendali integral, tetapi kemampuan pengendali integral menghilangkan offset tidak disertai dengan kemampuan bereaksi secara cepat. Oleh karena itu pengendali integral biasanya dipakai dalam kombinasi dengan pengendali proporsional.

Persamaan fungsi transfer Pengendali Integral :

$$O = \frac{1}{T_R} Gc \int e \cdot dt + B$$

Dimana:

O = Besarnya output

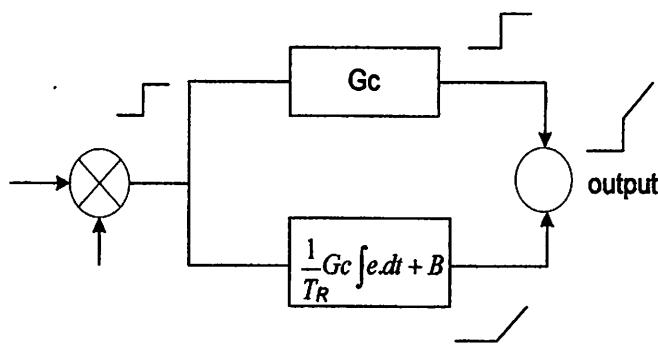
e = error

- B = Bias
 TR = Integral Time
 Gc = Gain dari kontroler

2.3.4 Pengendalian Proporsional plus Integral (PI)

Gabungan antara kontroler P dan I dapat menghilangkan steady state error dan mempercepat output sistem mendekati harga input. Konstanta PI kontroler terdiri dari K_P dan T_I, dimana T_I mengatur aksi kontrol Integral sedang K_P mempengaruhi aksi kontrol, baik bagian proporsional maupun bagian Integral. Pengendali PI merupakan gabungan dari unit kontrol P dan I, sifat pengendali P yang selalu meninggalkan *offset* dapat ditutupi oleh pengendali I, sedangkan sifat pengendali I yang lambat dapat ditutupi oleh pengendali P. Sehingga pengendalian PI menghasilkan respons yang lebih cepat dari pengendalian Integral tetapi mampu menghilangkan *offset* yang ditinggalkan pengendali P.

Untuk memperbaiki lambatnya respon pengendali I dipasang paralel dengan pengendali P yang kemudian menjadi pengendali PI



Gambar 2.12
Diagram Blok Kontroler PI

2.4 Penguatan

Pada Alternator kumparan medan (rotor) diberi eksitasi (penguatan) dengan arus searah, arus searah tersebut dapat diperoleh dari sumber arus searah atau dari arus bolak – balik yang disearahkan. Arus eksitasi dapat diambil dari alternator itu sendiri disebut penguatan sendiri, yaitu dengan memanfaatkan sisa magnet pada kutub, dan apabila sumber listrik lain yang memberikan eksitasi pada alternator itu sendiri disebut penguatan terpisah.

Pada suatu stasiun tenaga, kadang-kadang digunakan jala-jala khusus untuk memberikan eksitasi pada generator sinkron, tetapi yang sering digunakan adalah eksiter tersendiri bagi tiap-tiap alternator tersebut.

2.5 AVR (*Automatic Voltage Regulator*)

Sistem pengaturan tegangan otomatis pada Alternator dilakukan dengan pengaturan arus eksitasi dalam hal mengimbangi perubahan arus beban terhadap perubahan tegangan terminal, sehingga arus eksitasi diubah sesuai dengan perubahan tegangan.

Prinsip kerja AVR yaitu jika setting tegangan lebih tinggi dari tegangan deteksi, maka AVR memberikan *trigger* untuk sudut penyalaan thyristor lebih tinggi, sehingga arus medan (I_f) naik, dengan demikian tegangan alternator akan naik. Jika tegangan deteksi lebih tinggi dari setting, maka AVR akan memberikan tanda untuk merubah sudut penyalaan thyristor menjadi lebih kecil, sehingga I_f turun dan tegangan alternator akan turun. Jika tegangan deteksi sama dengan tegangan setting, maka sudut penyalaan thyristor akan dijaga oleh AVR, sehingga tegangan out put alternator akan stabil.

Pada PLTMH ITN Malang untuk menjaga agar tegangan keluaran Alternator tetap stabil yaitu 12 volt DC maka diperlukan sebuah AVR, yang sesuai pada rumus :

$$E = cn \Phi$$

Di mana : E = Tegangan keluaran Alternator (volt).

c = konstanta.

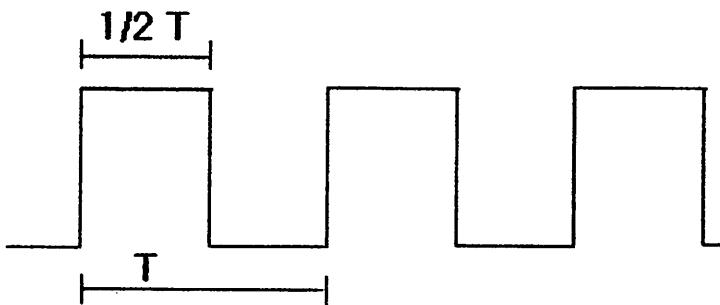
n = Putaran Generator DC (rpm).

Φ = Fluks medan magnit.

2.6 PWM (Pulse Width Modulation)

PWM merupakan suatu sistem kerja yang berdasarkan lebar pulsa, pulsa tersebut dalam bentuk digital, yang mana pulsa digital yang dibentuk digunakan membangkitkan tegangan pada sistem. PWM terdiri dari penghasil pulsa dan pembangkit pulsa dan pemodulasi pulsa atau pengatur lebar pulsa serta rangkaian driver untuk penyesuaian kecepatan

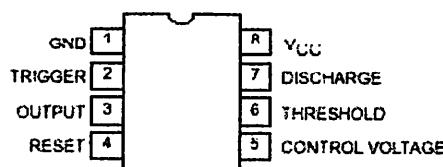
Prinsip Kerja PWM untuk pengaturan kecepatan motor adalah pengaturan kecepatan motor dengan cara merubah-rubah besarnya duty cycle pulsa. Duty cycle merupakan lama waktu sebuah pulsa dalam keadaan aktif atau high, juga merupakan prosentase sebuah periode. Pulsa yang yang berubah ubah duty cyclenya inilah yang menentukan kecepatan motor. Besarnya amplitudo dan frekuensi pulsa adalah tetap, sedangkan besarnya duty cycle berubah-ubah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan, semakin besar duty cylce maka semakin cepat pula kecepatan motor, dan sebaliknya semakin kecil duty cycle maka semakin pelan pula kecepatan motor.



Gambar 2.13
Pulsa PWM Dengan Duty Cycle 50 %

2.7 IC Timer 555

IC timer 555 sudah dikenal sejak puluhan tahun yang lalu. Tepatnya IC 555 pertama kali dibuat oleh **Signetics Corporation** pada tahun 1971. IC timer 555 memberi solusi praktis dan relatif murah untuk berbagai aplikasi elektronik yang berkenaan dengan pewaktuan (*timing*). Komponen utamanya terdiri dari komparator dan flip-flop yang direalisasikan dengan banyak transistor.



Gambar 2.14
Diagram Pin IC 555

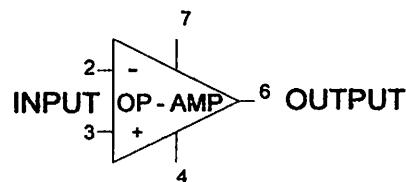
Hampir semua pabrikan membuat komponen jenis ini, walaupun dengan nama yang berbeda-beda. Misalnya National Semiconductor menyebutnya dengan LM 555, Philips dan Texas Instrument menamakannya SE/NE 555. Motorola / ON-Semi mendesainnya dengan transistor CMOS dan menamakannya MC1455. Philips dan Maxim membuat versi CMOS-nya dengan nama ICM7555. Walaupun

namanya berbeda-beda, tetapi fungsi dan pin diagramnya saling kompatibel satu dengan yang lainnya (*functional and pin-to-pin compatible*). Hanya saja ada beberapa karakteristik spesifik yang berbeda misalnya konsumsi daya, frekuensi maksimum dan sebagainya. Spesifikasi lebih detail dicantumkan pada datasheet masing-masing pabrikan.

2.8 Operational Amplifier

Istilah penguat operasional (*operational amplifier*) mulai dipakai dalam lapangan computer analog, yaitu untuk mengerjakan operasi perhitungan. Dalam rangkaian-rangkaian penguat, sifat rangkaian tersebut ditentukan oleh *feedback* diluar penguat operasional yang mana mempunyai beberapa keuntungan, diantaranya ukurannya kecil, keandalannya tinggi,, tidak terlalu sensitive terhadap kenaikan temperature, dan banyak dijual dipasaran.

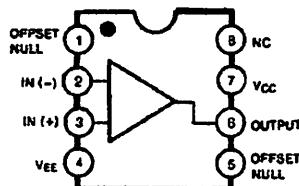
Pada gambar 2.15 memperlihatkan terminal-terminal dasar untuk input dari *Op-Amp* yang terdiri dari dua terminal input dan satu terminal output. Pada terminal input 2 merupakan terminal input *inverting* karena sinyal yang masuk akan merubah polaritas pada outputnya. Sedangkan pada terminal input 3 merupakan terminal input *non-inverting* karena sinyal yang masuk tidak akan merubah polaritasnya pada outputnya.



Gambar 2.15
Rangkaian dasar Op-Amp

2.8.1 IC 741

IC 741 merupakan salah satu jenis IC yang banyak digunakan dalam *operational amplifier* (op-amp).

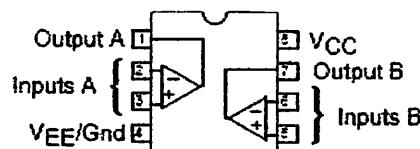


Gambar 2.16
Diagram Pin IC 741

Gambar diatas menunjukkan sebuah blok IC 741 yang mempunyai masukan tak membalik V+ (non inverting) pada input kaki 3, masukan membalik V- (inverting) pada kaki 2 dan keluaran pada kaki 6. sedangkan untuk supply nya digunakan simetris, pada kaki 7 merupakan supply tegangan positif dan kaki 4 merupakan supply tegangan negatif

2.8.2 IC 358

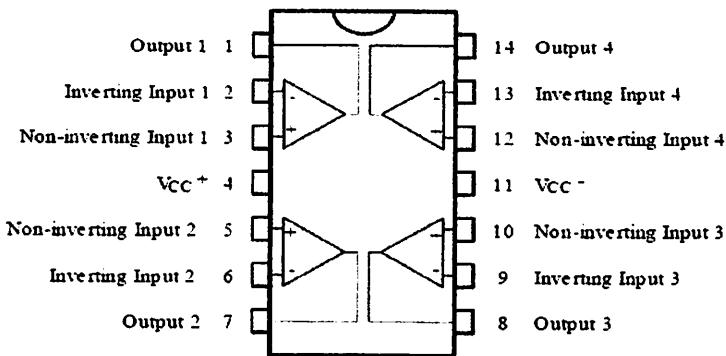
IC 358 salah satu jenis IC yang digunakan dalam *operational amplifier*, yang di dalamnya terdapat dua op-amp. IC ini dapat bekerja pada tegangan 3 – 32 Volt. Untuk diagram pinnya hampir sama dengan IC 741 hanya saja IC ini bekerja dengan single supply untuk pengoperasianya. Gambar 2.17 menunjukkan blok IC 358 yang terdiri dari dua op amp.



Gambar 2.17
Diagram Pin IC 358

2.8.3 IC LM 324

IC 324 juga merupakan salah satu jenis IC yang banyak digunakan dalam *operasional amplifier*. IC ini dapat bekerja pada tegangan 3 – 32 Volt. Keutamaan IC jenis ini yaitu mempunyai 4 OP-AMP dalam satu IC. Pada hakikatnya IC 324 sama dengan IC 741 hanya saja untuk Supply IC 324 membutuhkan single supply sedangkan IC 741 membutuhkan supply simetri.



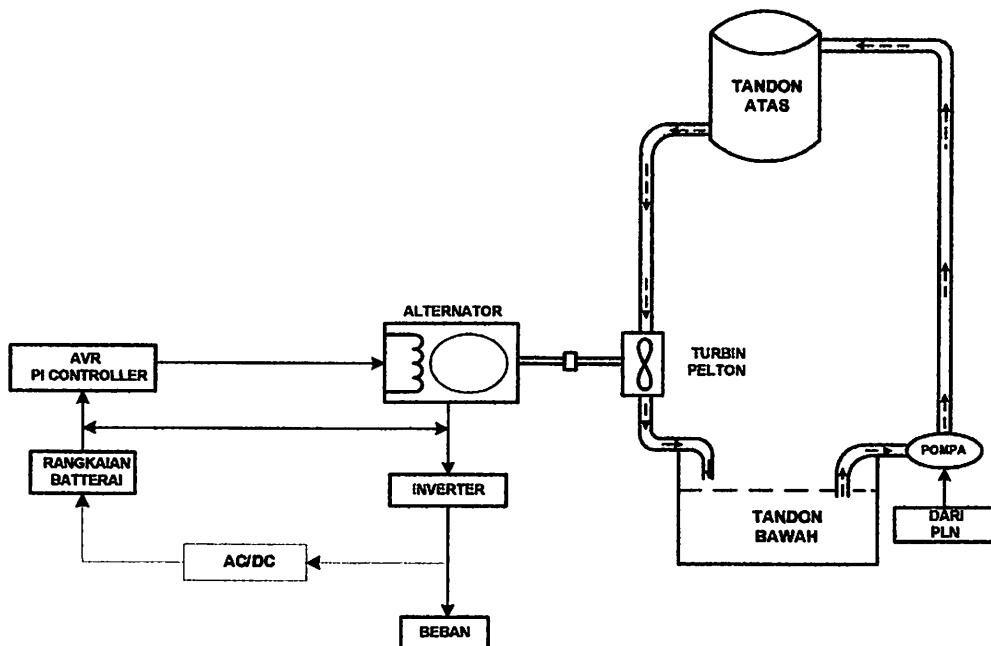
Gambar 2.18

Kemasan IC 324

BAB III

PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AVR DENGAN PI CONTROLLER PADA PLTMH ITN MALANG

3.1 PLTMH ITN MALANG



Gambar 3.1
Diagram Sistem PLTMH

Pada dasarnya prinsip kerja dari keseluruhan sistem PLTMH ITN Malang yaitu, air dari tandon atas dialirkan ke bawah melalui pipa, dari pipa, air dimasukan ke turbin air jenis pelton sehingga turbin berputar setelah itu air menuju tandon bawah lalu di pompa kembali ke tandon atas.

Poros tubin air dikopel dengan poros Alternator, sehingga pada saat turbin berputar maka Alternator juga ikut berputar. Untuk menghasilkan energi listrik, alternator diberi eksitasi dan untuk menjaga kestabilan tegangan pada Alternator yang dipengaruhi oleh kebutuhan beban maka dipasang AVR dengan kontroler PI.

Setelah itu tegangan keluaran dari Alternator diumpan balik terhadap AVR dan juga sebagai inputan inverter guna untuk mengubah tegangan DC yang dihasilkan dari Alternator menjadi tegangan AC, selain mendapatkan supply dari alternator inverter juga mendapatkan supply dari baterai jika tegangan pada alternator menurun. Setelah itu keluaran inverter diparalel yang satu dihubungkan dengan Converter dan yang lainnya dihubungkan ke beban. Rangkaian converter digunakan untuk mengisi aki.

3.2 Data Pada PLTMH ITN Malang

Data pada Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) ITN Malang :

1. Generator

- Type : Alternator
- Daya : Max 450 Watt
- Tegangan : 12 Volt DC
- Putaran : 1500 rpm

2. Inverter

- Daya : Max 300 Watt
- Tegangan
 - Input : 12 Volt DC
 - Output : 220 Volt AC
- Frekuensi : 50 Hz

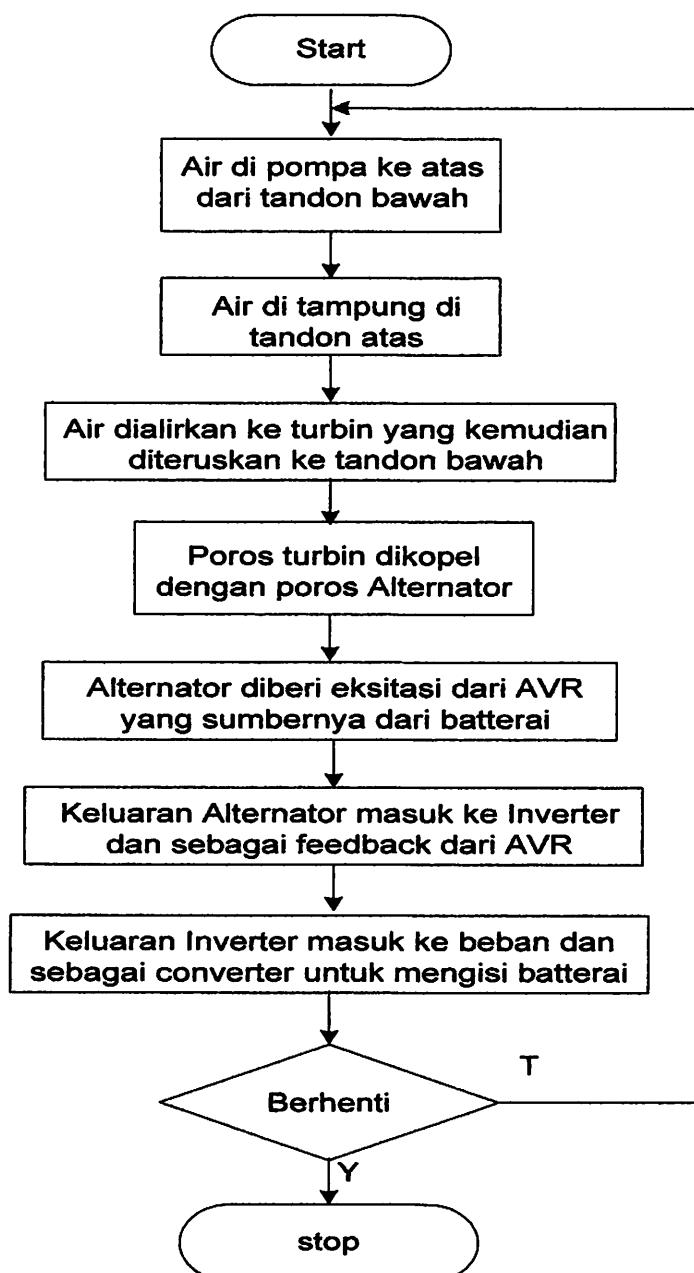
3. Turbin

- Type : Turbin Pelton Mikro.
- Daya : 77,479 Watt
- Putaran : 364 rpm
- Debit : 0,000718 m³/det

4. Gearbox

Pada PLTMH ini menggunakan gearbox untuk mempercepat putaran Alternator. Berdasarkan data turbin diperoleh putaran 364 rpm, oleh karena itu agar putaran alternator tersebut mendekati putaran nominalnya maka dibutuhkan gearbox dengan perbandingan 1 : 2

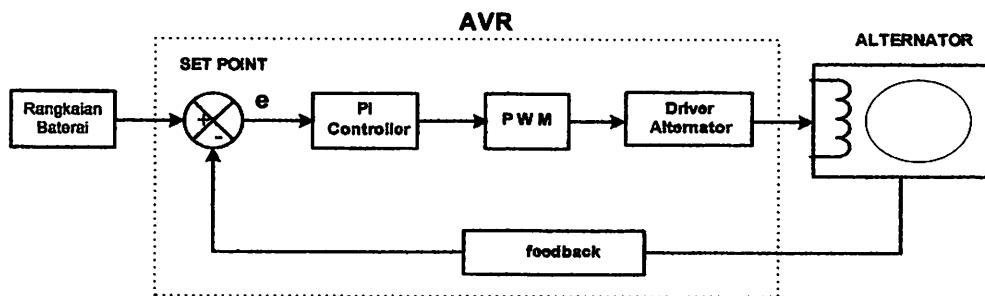
3.3. Diagram Alir PLTMH



3.4 Perancangan dan Pembuatan AVR

Untuk merancang dan membuat AVR dengan PI kontroler maka perlu dipahami terlebih dahulu diagram blok sistem dan perhitungan-perhitungan serta perancangan - perancangan hardware. Secara garis besar, perancangan dalam skripsi ini hanya dalam perangkat keras (*hardware*).

Untuk mendeskripsikan keseluruhan unit dan hubungan tiap unit dalam merancang AVR dengan PI kontroler, maka dapat dilihat pada blok diagram berikut ini :



Gambar 3.2
Diagram Blok Perancangan AVR

Prinsip kerja AVR dengan PI kontroler secara keseluruhan digambarkan seperti blok diagram di atas, yaitu AVR dihubungkan dengan sumber tenaga yang berasal dari accu, selanjutnya data dikirim ke unit PI controller untuk diolah lebih lanjut. Data yang telah diolah oleh PI controller selanjutnya diteruskan ke PWM generator yang berfungsi mengatur lebar pulsa sesuai dengan tegangan dan arus yang diperlukan oleh inverter dan untuk mensuplai tenaga sesuai beban. Pulsa yang telah diatur oleh PWM generator tersebut dipicu oleh driver Alternator berupa Mosfet IRF 540 untuk mengendalikan tegangan eksitasi. Kemudian keluaran Alternator tersebut diumpan balik terhadap rangkaian setpoint agar kestabilan sistem tetap terjaga.

3.4.1 Rangkaian Astable

Prinsip rangkaian astable dibuat agar memicu dirinya sendiri berulang-ulang sehingga rangkaian ini dapat menghasilkan sinyal osilasi pada keluarannya. Pada saat rangkaian ini di hubungkan dengan power supply, kapasitor C mulai terisi melalui resistor Ra dan Rb sampai mencapai tegangan $2/3 V_{CC}$. resistor Rb seolah dihubung ke ground sehingga kapasitor C membuang muatannya (*discharging*) melalui resistor Rb. Pada saat ini keluaran pin 3 menjadi 0 (GND). Ketika discharging, tegangan pada pin 2 terus turun sampai mencapai $1/3 V_{CC}$. Ini menyebabkan keluaran pin 3 kembali menjadi high (V_{CC}). Demikian seterusnya berulang-ulang sehingga terbentuk sinyal osilasi pada keluaran pin 3. Terlihat di sini sinyal pemicu (*trigger*) kedua komparator tersebut bekerja bergantian pada tegangan antara $1/3 V_{CC}$ dan $2/3 V_{CC}$. Inilah batasan untuk mengetahui lebar pulsa dan periode osilasi yang dihasilkan. Dengan perhitungan eksponensial dengan batasan $1/3 V_{CC}$ dan $2/3 V_{CC}$ maka dapat diperoleh :

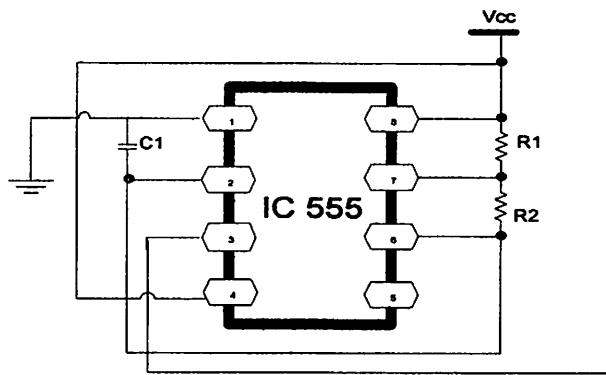
$$t_1 = \ln(2) (R_a + R_b)C = 0.693 (R_a + R_b)C ;$$

$$t_2 = \ln(2) R_b C = 0.693 R_b C$$

Periode osilator dapat diketahui dengan menghitung;

$$T = t_1 + t_2.$$

t_1 adalah waktu proses pengisian kapasitor yang diisi melalui resistor Ra dan Rb dari $1/3 V_{CC}$ sampai $2/3 V_{CC}$, t_2 adalah waktu discharging kapasitor melalui resistor Rb dari tegangan $2/3 V_{CC}$ menjadi $1/3 V_{CC}$.

**Gambar 3.3****Rangkaian Astable**

Dalam perancangan rangkaian ini menggunakan :

⇒ $V_{cc} = 12 \text{ V DC}$

⇒ IC NE 555

⇒ $R_1 = 100 \text{ K}\Omega$

⇒ $R_2 = 100 \text{ K}\Omega$

⇒ $C_1 = 10 \text{ nF}$

Didapatkan rangkaian dari pembangkit segitiga

$$\circ \quad t_1 = \ln(2) (R_a + R_b) C_1 = 0.693 (100 \cdot 10^3 + 100 \cdot 10^3) 10 \cdot 10^{-9} \\ = 0.01386$$

$$\circ \quad t_2 = \ln(2) R_b C = 0.693 \times 100 \cdot 10^3 \times 10 \cdot 10^{-9} \\ = 0.00693$$

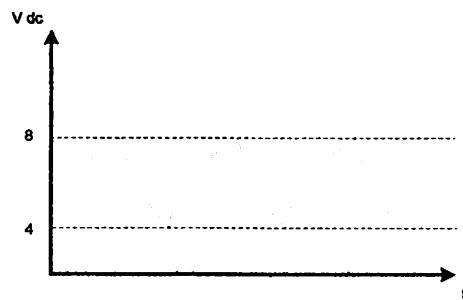
$$\circ \quad T = t_1 + t_2 = 0.01386 + 0.00693 = 0.02079$$

$$\circ \quad f = 1/T = 1/0.02079 = 48.10005 \text{ Hz}$$

Sehingga bentuk gelombang segitiga keluaran dari rangkaian tersebut diatas adalah sebagai berikut;

$$\begin{aligned} V \text{ peak atas} &= 2/3 * V_{cc} \\ &= 2/3 * 12 = 8 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} V \text{ peak bawah} &= 1/3 * V_{cc} \\ &= 1/3 * 12 = 4 \end{aligned}$$

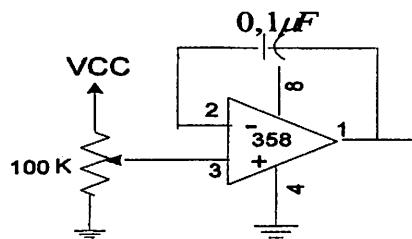


Gambar 3.4

Bentuk gelombang segitiga keluaran rangkaian pembangkit tegangan dc

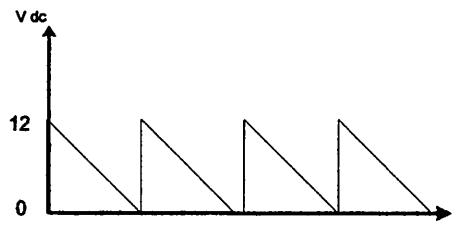
3.4.2 Rangkaian Komparator

Rangkaian komparator disini menggunakan IC 358 yang berfungsi untuk memperbaiki sinyal keluaran dari rangkaian astable yang masih mengambang di atas nilai nol (ground) sehingga dihasilkan rangkaian pembangkit segitiga yang lebih baik dari rangkaian astable.



Gambar 3.5

Rangkaian skematik IC 358



Gambar 3.6

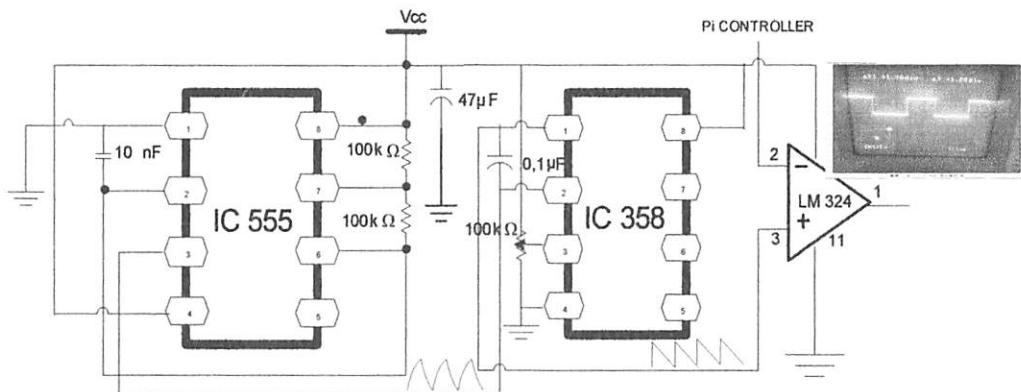
Bentuk gelombang segitiga keluaran rangkaian komparator

3.4.3 Rangkaian PWM (Pulse Width Modulation)

Untuk pengaturan putaran Alternator digunakan metode kontrol Pulse Width Modulation (PWM), dimana pada bagian kontrol PWM terdiri dari:

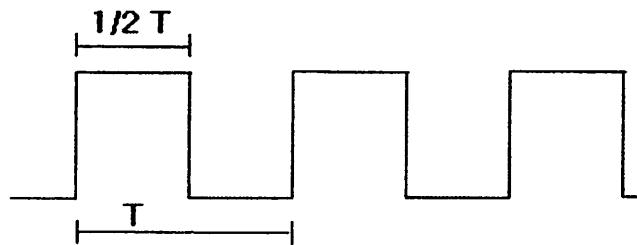
- PWM generator terdiri dari pembangkit sinyal segitiga serta komparator dari sinyal segitiga terhadap sinyal rata yang diinjeksikan
- Rangkaian driver Alternator untuk mengatur tegangan eksitasi pada Alternator.

Rangkaian dasar Pulse Width Modulation (PWM) pada dasarnya adalah rangkaian pembanding (komparator) dari sinyal tegangan yang rata dan berbentuk segitiga atau gigi gergaji (ramp) dengan sinyal tegangan dc yang diajust (diatur) naik turun secara linier sehingga bentuk keluarannya adalah tegangan dc rata yang berperiode kondisi on-off nya.



Gambar 3.7
Rangkaian Pulse Width Modulation

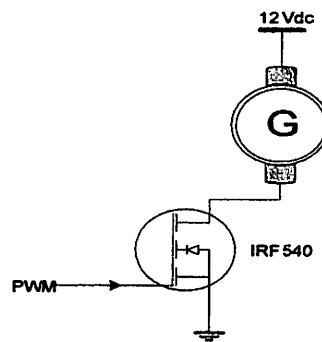
Prinsip Kerja PWM untuk pengaturan eksitasi dengan cara merubah-rubah besarnya duty cycle pulsa. Duty cycle merupakan lama waktu sebuah pulsa dalam keadaan aktif atau high, juga merupakan prosentase sebuah periode. Pulsa yang yang berubah ubah duty cyclenya inilah yang menentukan besarnya eksitasi yang akan berpengaruh pada kecepatan putar, besarnya duty cycle berubah-ubah sesuai dengan eksitasi yang diinginkan, semakin besar duty cylce maka semakin besar eksitasinya, dan sebaliknya semakin kecil duty cycle maka semakin kecil pula eksitasi pada Alternator.



Gambar 3.8
Pulsa PWM Dengan Duty Cycle 50 %

3.4.4 Rangkaian Driver Alternator

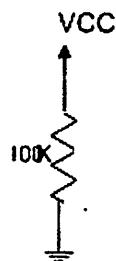
Setelah terdapat tegangan keluaran pwm berupa tegangan DC yang dapat diatur duty cyclenya, maka tegangan tersebut dipicukan ke IRF 540 untuk mengendalikan arus eksitasi seperti pada gambar berikut;



Gambar 3.9
Rangkaian Driver Alternator

3.4.5 Set point

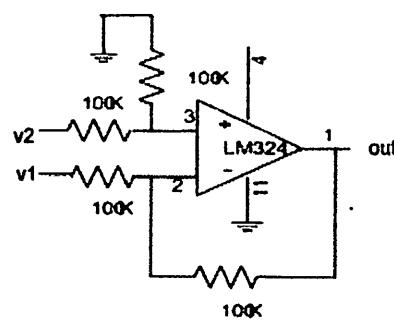
Set point digunakan sebagai acuan tegangan sistem, agar bekerja pada kondisi yang diharapkan. Rangkaian set point merupakan suatu resistor variabel yang telah ditentukan untuk nilai Vcc nya. Vcc set point untuk rangkaian tersebut adalah 12 volt, sesuai dengan tegangan pada rangkaian batterai.



Gambar 3.10
Rangkaian Set point

3.4.6 Rangkaian Deferensial

Rangkaian deferensial merupakan rangkaian pengurang, yang mana rangkaianya seperti pada gambar di bawah :



Gambar 3.11
Rangkaian Deferensial

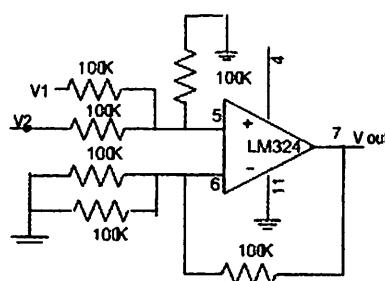
Untuk V_{out} rangkaian deferensial / pengurang adalah

$$V_{out} = -(V_2 - V_1)$$

$$= V_1 - V_2$$

3.4.7 Rangkaian Penjumlah / Bias

Rangkaian bias digunakan untuk mempertahankan agar keluaran dari rangkaian bias tidak nol, meskipun inputan dari rangkaian tersebut adalah nol.



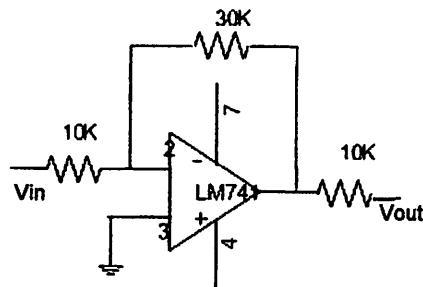
Gambar 3.12
Rangkaian Penjumlah

Untuk V_{out} rangkaian penjumlah adalah

$$V_{out} = -(V_1 + V_2)$$

3.4.4 Rangkaian Proporsional

Rangkaian Proporsional merupakan rangkaian penguat inverting yang mana tegangan keluarannya sesuai dengan pembesaran yang dikehendaki, agar tegangan keluarannya lebih besar dari tegangan masukkannya.



Gambar 3.13
Rangkaian Proporsional

Untuk Rangkaian Proporsional

$$K_p = 10;$$

Penguatan *Inverting* Pada IC LM 741 :

$$\text{Gain} = \frac{R_2}{R_1}$$

$$= 30 \text{ k}\Omega / 10 \text{ k}\Omega$$

$$= 3 \text{ kali}$$

3.4.5 Rangkaian Integral

Rangkaian Integral digunakan untuk waktu respon terhadap perubahan beban agar sistem tetap stabil.

Untuk Rangkaian Integral :

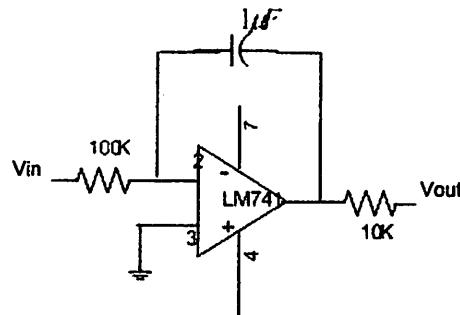
$$C = 1 \mu\text{F}$$

$$R = 100 \text{ k}\Omega$$

$$T_i = R \cdot C$$

$$= 100000 \Omega \cdot 1.10^{-6} F$$

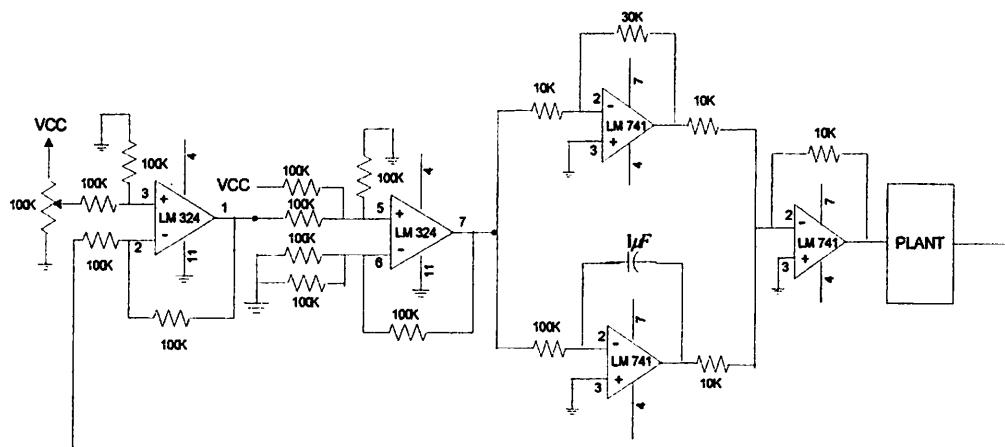
$$= 0,1 \text{ detik}$$



Gambar 3.14
Rangkaian Integral

3.4.10 Rangkaian PI kontroler

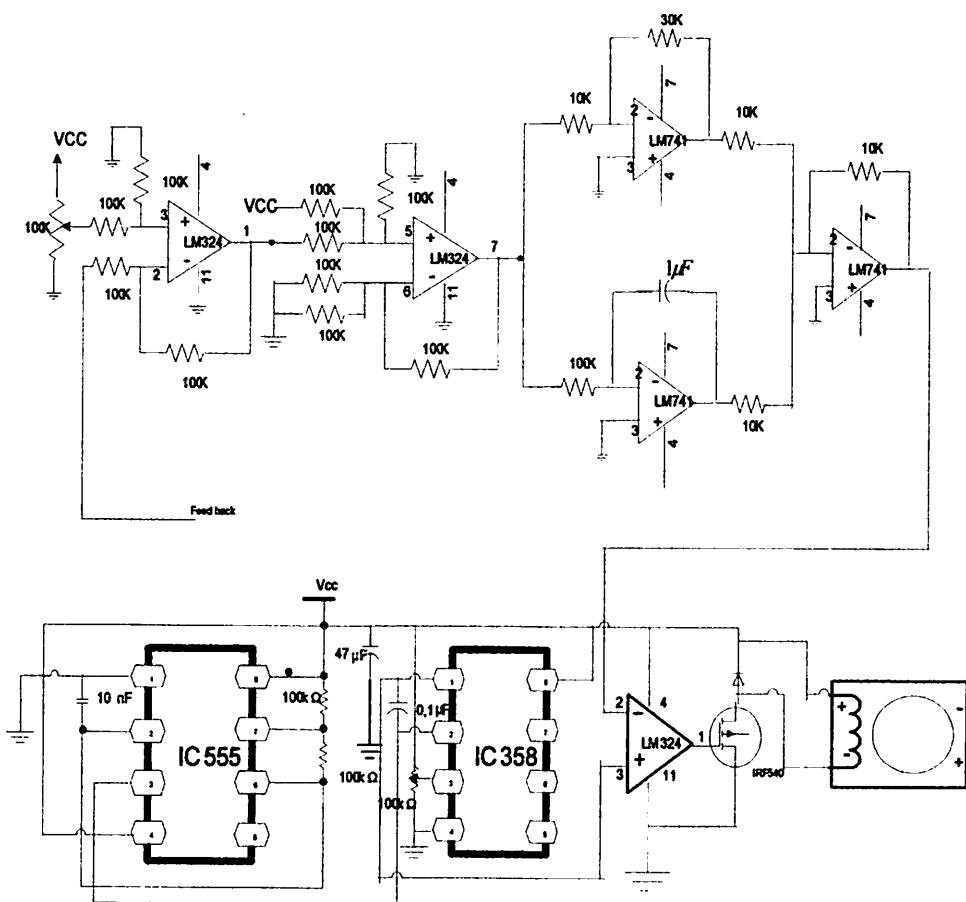
Rangkaian PI kontroler merupakan rangkaian kombinasi dari rangkaian setpoint, rangkaian deferensial, rangkaian penjumlahan, rangkaian proporsional, dan rangkaian Integral.



Gambar 3.15
Rangkaian Proporsional plus Integral

3.5 Rangkaian AVR Dengan PI kontroler

Rangkaian AVR dengan PI kontroler merupakan rangkaian PI dan rangkaian PWM yang digunakan untuk mengatur arus eksitasi pada Alternator sehingga tegangan keluaran Alternator tetap stabil 12 Volt.



Gambar 3.16

Rangkaian Proporsional plus Integral

BAB IV

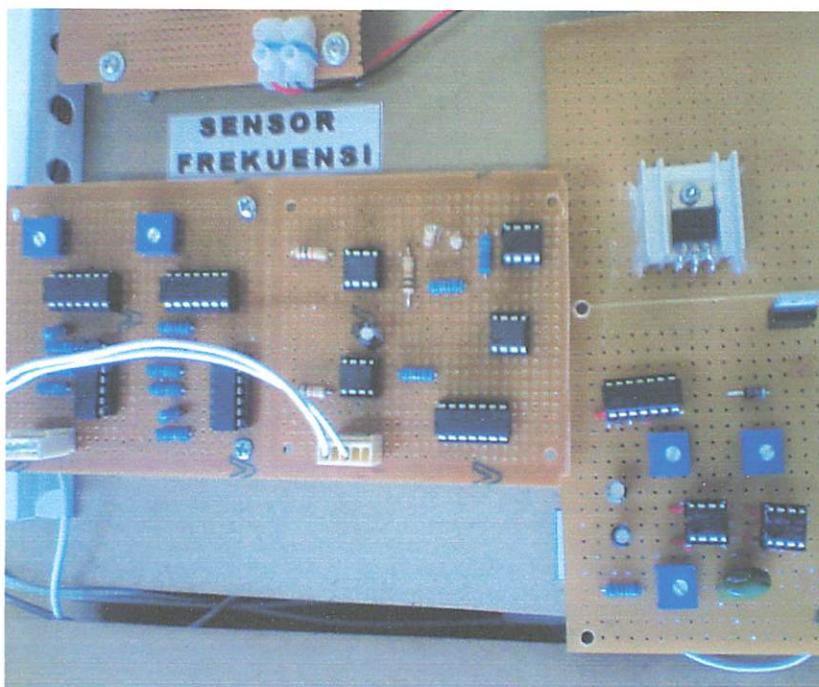
ANALISA DAN EVALUASI AVR DENGAN PI KONTROLER PADA PLTMH ITN MALANG

4.1 Pengujian dan Pengukuran AVR

Pada pengujian dan pengukuran AVR bertujuan untuk menguji kestabilan dan keandalan dari AVR dalam pengaplikasiannya pada PLTMH ITN Malang.

Peralatan – peralatan yang digunakan untuk melakukan pengujian dan pengukuran, antara lain :

- a.. Volt meter SANWA CD – 720 E, DIGITAL MULTIMETER.
- b. Ampere meter SANWA CD – 720 E, DIGITAL MULTIMETER.

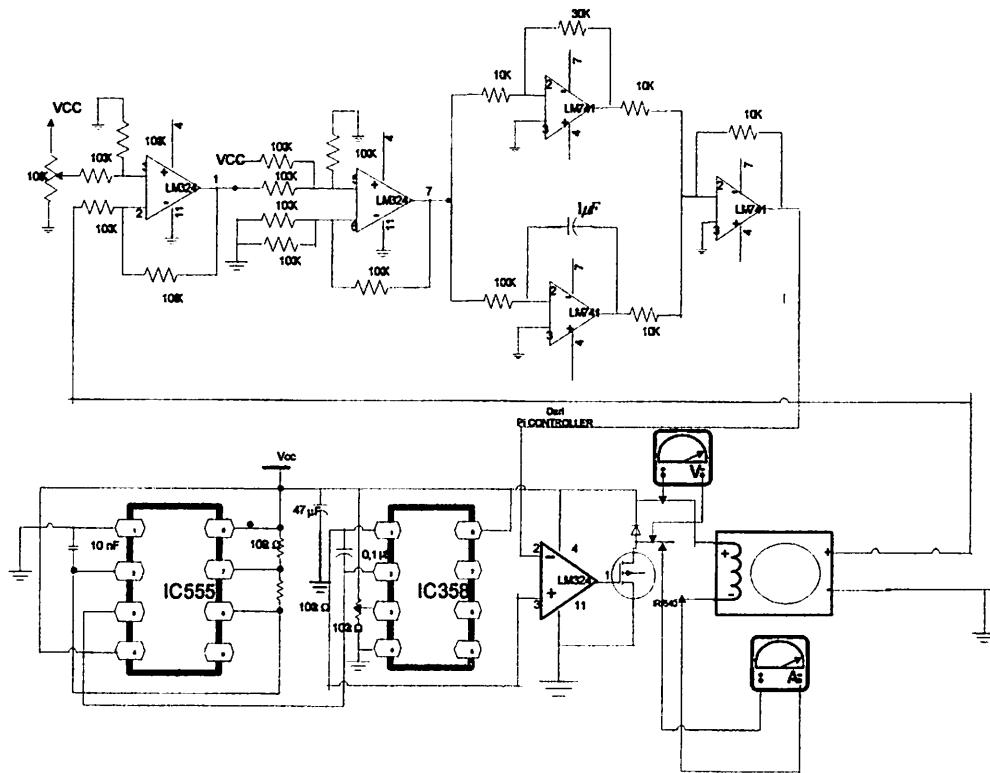


Gambar 4.1
Rangkaian AVR Dengan PI Kontroler

4.2 Hasil Pengujian Dan Pengukuran AVR

4.2.1 Hasil pengujian AVR terhadap Tegangan eksitasi dan Arus eksitasi

Pada pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui tegangan dan arus eksitasi yang masuk ke kumparan medan alternator sesuai dengan beban yang telah ditentukan.



Gambar 4.2

Skema Pengukuran AVR terhadap Tegangan Eksitasi dan Arus Eksitasi

Tabel 4.1**Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Eksitasi**

Beban	Tegangan Eksitasi (Volt)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	V rata-rata
Tanpa Beban	10,91	10,89	10,9	10,91	10,92	10,906
Lampu 20 W	10,92	10,93	10,91	10,92	10,92	10,92
Lampu 40 W	10,94	10,95	10,94	10,93	10,95	10,94
Lampu 60 W	10,96	10,97	10,98	10,96	10,95	10,964

Tabel 4.2**Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Eksitasi**

Beban	Arus Eksitasi (Ampere)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	I rata-rata
Tanpa Beban	2,01	2,00	2,01	2,02	2,02	2,012
Lampu 20 W	2,03	2,04	2,04	2,03	2,02	2,032
Lampu 40 W	2,05	2,05	2,04	2,06	2,04	2,048
Lampu 60 W	2,06	2,06	2,07	2,08	2,06	2,066

Tabel 4.3
Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Eksitasi
Pada PLTMH ITN Malang

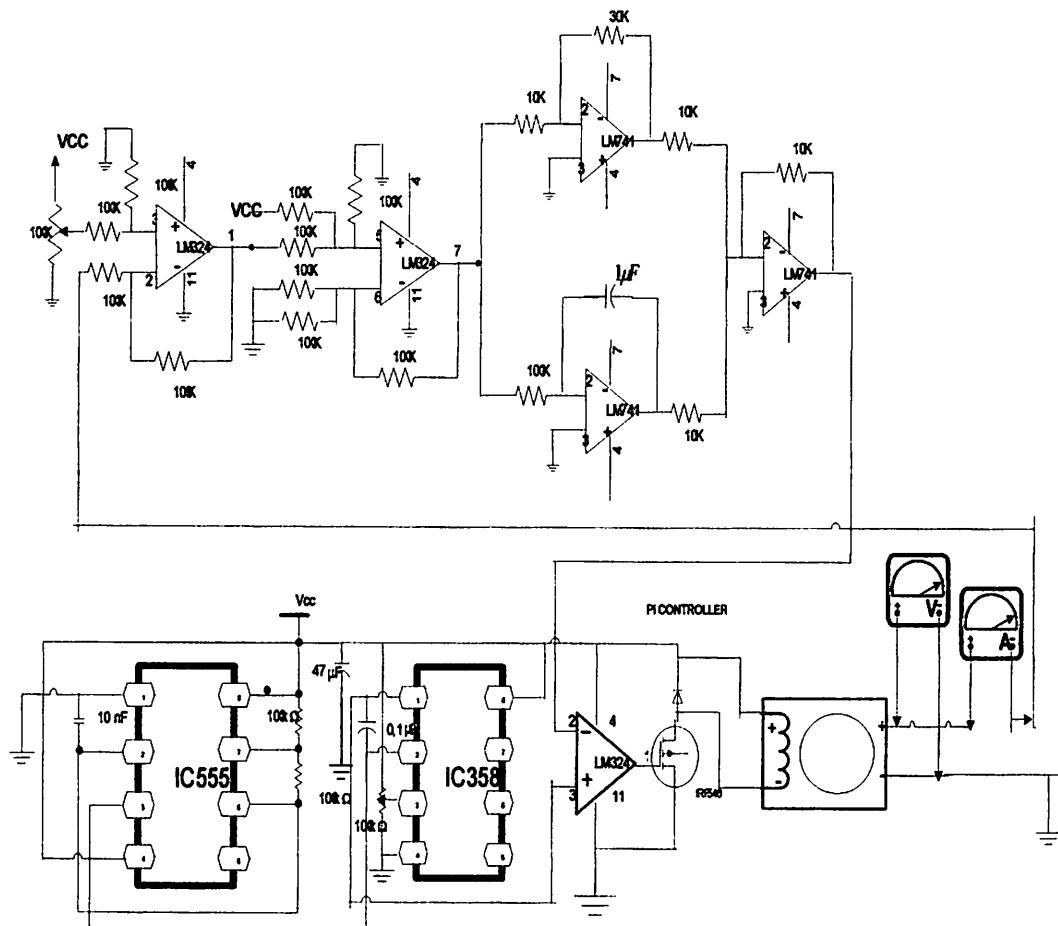
Beban	Tegangan Eksitasi (Volt)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	V rata-rata
Tanpa Beban	12,17	12,16	12,18	12,36	12,38	12,35
Lampu 20 W	11,84	11,87	11,85	11,83	11,81	11,84
Lampu 40 W	11,59	11,57	11,53	11,55	11,51	11,55
Lampu 60 W	10,97	10,98	10,97	10,98	10,99	10,978

Tabel 4.4
Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Eksitasi
Pada PLTMH ITN Malang

Beban	Arus Eksitasi (Ampere)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	I rata-rata
Tanpa Beban	0,21	0,22	0,24	0,20	0,23	0,22
Lampu 20 W	0,18	0,18	0,19	0,15	0,18	0,176
Lampu 40 W	0,17	0,18	0,17	0,2	0,15	0,174
Lampu 60 W	0,17	0,16	0,17	0,15	0,19	0,168

4.2.2 Hasil pengujian AVR terhadap Tegangan dan Arus Keluaran Alternator

Pada pengujian ini dimaksudkan untuk mengetahui tegangan dan arus keluaran dari Alternator, sesuai dengan beban yang telah ditentukan.



Gambar 4.3

Skema Pengukuran AVR terhadap Tegangan dan Arus Keluaran dari Alternator

Tabel 4.5

**Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Keluaran
Alternator**

Beban	Tegangan Keluaran Alternator (Volt)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	V rata-rata
Tanpa Beban	12,1	12,0	12,02	12,07	12,11	12,06
Lampu 20 W	11,98	11,99	11,97	11,98	11,98	11,98
Lampu 40 W	11,95	11,96	11,96	11,95	11,94	11,952
Lampu 60 W	11,91	11,92	11,92	11,91	11,92	11,916

Tabel 4.6

**Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Keluaran
Alternator**

Beban	Arus Keluaran Alternator (Ampere)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	I rata-rata
Tanpa Beban	0,47	0,48	0,49	0,47	0,48	0,478
Lampu 20 W	0,81	0,82	0,80	0,82	0,82	0,814
Lampu 40 W	0,95	0,96	0,97	0,98	0,96	0,964
Lampu 60 W	1,02	1,01	1,02	1,04	1,03	1,024

Tabel 4.7

**Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Tegangan Keluaran
Alternator Pada PLTMH ITN Malang**

Beban	Tegangan Keluaran Alternator (Volt)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	V rata-rata
Tanpa Beban	12,17	12,10	12,14	12,17	12,13	12,142
Lampu 20 W	12,12	12,12	12,11	12,10	12,11	12,112
Lampu 40 W	11,96	11,93	11,96	11,98	11,94	11,954
Lampu 60 W	11,69	11,71	11,73	11,67	11,73	11,706

Tabel 4.8

**Hasil pengujian AVR Dengan PI Kontroler terhadap Arus Keluaran
Alternator Pada PLTMH ITN Malang**

Beban	Arus Keluaran Alternator (Ampere)					
	Perc. I	Perc. II	Perc. III	Perc. IV	Perc. V	I rata-rata
Tanpa Beban	1,39	1,42	1,41	1,38	1,38	1,395
Lampu 20 W	1,52	1,54	1,51	1,53	1,57	1,534
Lampu 40 W	2,67	2,71	2,69	2,68	2,70	2,69
Lampu 60 W	3,32	3,31	3,27	3,34	3,31	3,31

4.3 Analisa Pengujian dan Pengukuran AVR

Pengujian dan pengukuran bertujuan untuk membandingkan antara keadaan tanpa beban dengan keadaan beban penuh, dimana pengujian tersebut dilakukan pada mesin di laboratorium dan mesin pada PLTMH.

Pada mesin di laboratorium menggunakan motor 1 phasa sebagai pengganti turbin, sehingga alternator diputar menggunakan motor. Pada pengujian tersebut didapat putaran alternator sebesar 1495 rpm, yang menghasilkan tegangan 12,06 V. Sedangkan pada pengujian pada PLTMH generator diputar oleh turbin pada putaran 521,3 rpm dengan tegangan sebesar 7,42 V. Untuk mengatasi agar tegangan alternator mendekati tegangan 12,06 V, maka dilakukan penggulungan ulang pada bagian stator yang bertujuan agar tegangan yang dihasilkan pada PLTMH hampir sama dengan tegangan pada pengujian dengan menggunakan motor.

Setelah dilakukan penggulungan ulang pada bagian stator, maka dengan putaran sebesar 521,3 rpm dihasilkan tegangan sebesar 12,47 V sehingga didapat hasil pengujian sebagai berikut :

1. Pengujian AVR terhadap tegangan keluaran alternator pada mesin di laboratorium, pada keadaan tanpa beban nilai tegangannya adalah 12,06 V dan pada keadaan beban penuh sebesar 11,916 V pada putaran 1495 rpm.
2. Pengujian AVR terhadap keluaran alternator pada PLTMH, pada keadaan tanpa beban nilai tegangannya adalah 12,142 V dan pada keadaan beban penuh sebesar 11,706 V pada putaran 521,3 rpm.

BAB V

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Dari hasil pengukuran dan pengujian dari AVR yang dibuat, maka dapat diambil kesimpulan bahwa AVR dapat diterapkan pada PLTMH untuk mengatur arus eksitasi dan menjaga tegangan keluaran Alternator agar tetap stabil, sehingga dapat ditarik kesimpulan sebagai berikut :

1. Rangkaian AVR menggunakan rangkaian PWM dan rangkaian kontroler PI dalam mengatur arus eksitasi untuk menjaga tegangan Alternator pada PLTMH agar sistem tetap stabil.
2. Pengujian AVR pada mesin di laboratorium dengan putaran 1495 rpm, pada keadaan tanpa beban, didapat tegangan keluaran Alternator 12,06 V dan pada beban penuh tegangannya 11,916 V dengan error sebesar 1,19 %
3. Pengujian AVR pada PLTMH dengan putaran 521,3 rpm, pada keadaan tanpa beban, didapat tegangan keluaran Alternator 12,142 V dan pada beban penuh tegangannya 11,706 V dengan error sebesar 3,59 %
4. Secara keseluruhan AVR ini dapat dikatakan bekerja dengan baik walaupun error yang dihasilkan masih terlalu besar.

5.2 Saran

Pada pengujian AVR pada mesin di laboratorium errornya sebesar 1,19 % sedangkan pada pengujian pada PLTMH errornya sebesar 3,19 %. Hal ini disebabkan karena adanya rugi – rugi pada sistem PLTMH dan kualitas komponen pada AVR. Untuk itu perlu menggunakan komponen yang kualitasnya lebih baik, agar error dapat ditekan sekecil mungkin

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Marsudi, Djiteng. Ir, “**Pembangkitan Energi Listrik**”, Jakarta, ISTN.
- [2] Zuhal, “**Dasar Tenaga Listrik**”, Bandung, ITB.
- [3] Ogata Katsuhiko, **Teknik Kontrol Automatik Jilid I**, Penerbit Erlangga, Jakarta, 1989.
- [4] Elektro Indonesia, “**Pengenalan Metode Ziegler-Nichols pada Perancangan Kontroler pada PID**”, Maret 1998.
- [5] Turk J Elect Engin, ”**PI Controlled Based on Gain-Scheduling for Synchronous Generator**”, Vol.14, No.1, 2006.
- [6] Gunterus, Frans, “**Falsafah Dasar Sistem Pengendalian Proses**” Penerbit Elex Media Komputindo, Jakarta, 1994.

LAMPIREAN



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO S-1
KONSENTRASI TEKNIK ENERGI LISTRIK

**BERITA ACARA UJIAN SKRIPSI
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI**

1. Nama : Herman Susanto.
2. NIM : 02.12.064
3. Jurusan : Teknik Elektro S-1
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER PADA PEMNAGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK MESIN S-1 INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

Dipertahankan dihadapan Majelis Penguji Skripsi Jenjang Strata Satu (S-1) pada :

Hari : Rabu
Tanggal : 21 Maret 2007
Dengan Nilai : 77,8 (B+) *Zey*



Panitia Ujian Skripsi

Ir. Mochtar Asroni, MSME
Ketua

Ir. F. Yudi Limpraptono, MT
Sekretaris

Anggota Penguji

Ir. Teguh Herbasuki, MT
Penguji Pertama

Ir. Junior Siahaan
Penguji Kedua



(PERSERO) MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

PERKUMPULAN PENGETAHUAN PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

Kampus I : Jl. Bendungan Sriguna No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65146
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Nomor : ITN-1191/SKP/2/07
Lampiran : Satu Lembar
Perihal : Bimbingan Skripsi

Malang, 01 Maret 2007

Kepada : Yth. Sdr. Ir. H. ALMIZAN ABDULLAH, MSEE *)
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang
Di - Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam perpanjangan masa
bimbingan Skripsi yang telah dilakukan untuk Mahasiswa

Nama : HERMAN SUSANTO
Nim : 0212064
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik S-1

Dengan ini pembimbingan Skripsi tersebut kami serahkan kembali sepenuhnya
kepada Saudara/I, selama waktu 6 (Enam) bulan terhitung mulai tanggal:

29 Januari 2007 s/d 29 Juli 2007

Adapun tugas tersebut merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana
Teknik, Jurusan Teknik Elektro, apabila lewat dari batas waktu tsb, maka Skripsinya
di gugurkan demikian atas perhatian serta kerjasama yang baik kami ucapkan terima
kasih



Dr. F. YUDI LIMPAPITNO, MT. *[Signature]*
NIP. 1039500274

Tembusan Kepada Yth:

1. Perpanjangan kontrak *)
2. Mahasiswa Yang Bersangkutan
3. Arsip



PERKUMPULAN PENGELOLA PENDIDIKAN UMUM DAN TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
FAKULTAS TEKNIK SIPIL DAN PERENCANAAN
PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK

PT. BNI (PERSERO) MALANG
BANK NIAGA MALANG

Kampus I : Jl. Bendungan Sigura-gura No. 2 Telp. (0341) 551431 (Hunting), Fax. (0341) 553015 Malang 65145
Kampus II : Jl. Raya Karanglo, Km 2 Telp. (0341) 417636 Fax. (0341) 417634 Malang

Nomor : ITN-119/LSKP/2/07 Malang, 01 Maret 2007
Lampiran : Satu Lembar
Perihal : **Bimbingan Skripsi**
Kepada : Yth. Sdr. Ir. **WIDODO PUDJI M, MT ***
Dosen Institut Teknologi Nasional Malang
Di - Malang

Dengan hormat
Sesuai dengan permohonan dan persetujuan dalam perpanjangan masa bimbingan Skripsi yang telah dilakukan untuk Mahasiswa

Nama : HERMAN SUSANTO
Nim : 0212064
Fakultas : Teknologi Industri
Jurusan : Teknik Elektro
Konsentrasi : Teknik Energi Listrik S-1

Dengan ini pembimbingan Skripsi tersebut kami serahkan kembali sepenuhnya kepada Saudara/I, selama waktu **6 (Enam) bulan** terhitung mulai tanggal:

29 Januari 2007 s/d 29 Juli 2007

Adapun tugas tersebut merupakan salah satu syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik, Jurusan Teknik Elektro, apabila lewat dari batas waktu tsb, maka Skripsinya di gugurkan demikian atas perhatian serta kerjasama yang baik kami ucapkan terima kasih



Ir. F. Yudi Limpraptono, MT *Bay*
NIP. Y/1039500274

Tembusan Kepada Yth:

1. Perpanjangan kontrak *)
2. Mahasiswa Yang Bersangkutan
3. Arsip

EMBA
SILVEA



**INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO**

PERSETUJUAN PERBAIKAN SKRIPSI

Dari hasil ujian skripsi Jurusan Teknik Elektro jenjang strata satu (S-1) yang diselenggarakan pada :

Hari : Rabu
Tanggal : 21 Maret 2007

Telah dilakukan perbaikan skripsi oleh :

1. Nama : Herman Susanto
2. NIM : 02.12.064
3. Jurusan : Teknik Elektro S-1
4. Konsentrasi : Teknik Energi Listrik
5. Judul Skripsi : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK MESIN S-1 INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

Perbaikan meliputi :

No	Materi Perbaikan	Ket
1.	Seyogyanya pengujian dilakukan minimal 5 kali setiap item pengujian	

Anggota Penguji

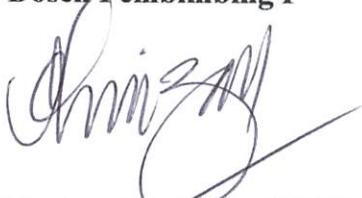


Ir. Teguh Herbasuki, MT
Penguji Pertama



Ir. Junior Siahaan
Penguji Kedua

Dosen Pembimbing I



Ir. H. Almizan Abdullah, MSEE

Dosen Pembimbing II

Ir. Widodo Pudji M, MT



INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : HERMAN SUSANTO
Nim : 02.12.064
Masa Bimbingan : 29 Juli 2006 s/d 29 Januari 2007
Judul Skripsi : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER PADA PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO DI LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK MESIN S-1
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

No.	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	28-08-06	Bab II : Sesuaikan pembicarannya dg ajar tp kelompole lainnya ; Bab III : Perlu penjelasan prinsip kerja .	
2.	12 - 12.06	Bab II : Makai Bab II karya tentang pen- lajaran teori, makai tentang sistem perencanaan di Bab III	
3.	19 - 12.06	Bab III : Materi mengenai PLTMH ITN karyanya seragam dengan ajar, golongan kelompole lainnya	
4.	16 - 01 - 07	Bab II : Perbaiki uraian tgl. kesimpulan dan saranannya .	
5.	23 - 01 - 07	Bab IV & V 1. Perbaiki jelasan seluruh que- tions di lab dan di PLTMH ber- beda dan alasannya . 2. Jgn jelas dilaporkan alatal pengaturan AVR dari beras tanpa dibayar ke beras pemasok	
6.			
7.	24-01-07	Clesii .	
8.			
9.			
10.			

Malang,
Dosen Pembimbing I

Ir. H. ALMIZAN ABDULLAH, MSEE
NIP. Y. 1039000 208



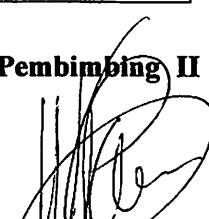
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

FORMULIR BIMBINGAN SKRIPSI

Nama : HERMAN SUSANTO
Nim : 02.12.064
Masa Bimbingan : 29 Januari 2007 s/d 29 Juli 2007
Judul Skripsi : PERANCANGAN DAN PEMBUATAN AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR (AVR) DENGAN PI CONTROLLER PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA MIKROHIDRO PADA LABORATORIUM LAPANGAN JURUSAN TEKNIK MESIN S-1
INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL MALANG

No.	Tanggal	Uraian	Paraf Pembimbing
1.	25/11/06	BAB I : Perbaikan Rumusan Masalah	
2.	20/12/06	BAB II : Lengkapi materi Penunjang	
3.	8/01/07	BAB III : Rancangan AVR perbaiki rangka PWM	
4.	3/2/07	BAB III : Lengkapi perhitungan komponen AVR	
5.	5/2/07	BAB IV : Perbaiki urutan pada BAB IV	
6.	17/2/07	BAB V : Sevalcon dg tujuan	
7.	19/2/07	ACC Seminar	
8.	22/2/07	Selesai	
9.			
10.			

Malang,
Dosen Pembimbing II


Ir. WIDODO PUDJI, M. MT
NIP. Y. 102 8700 171

INSTITUT TEKNOLOGI NASIONAL
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI
JURUSAN TEKNIK ELEKTRO

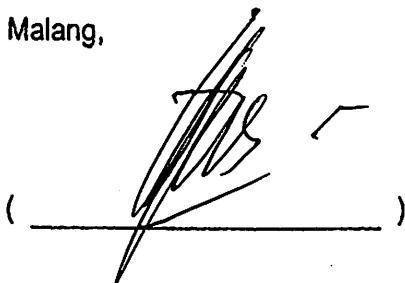
Formulir Perbaikan Ujian Skripsi

Dalam pelaksanaan Ujian Skripsi Janjang Strata 1 Jurusan Teknik Elektro Konsentasi T. Energi
Listrik / T. Elektronika, maka perlu adanya perbaikan skripsi untuk mahasiswa :

AMA
IM
erbaikan meliputi
: Herman Susanto
: 0212064.

Seyogaanya pengujian dilakukan minimal 5x
setiap item pengujian.

Malang,



DATA
DATA
SHEET



MOTOROLA

Order this document by LM358/D

Dual Low Power Operational Amplifiers

Utilizing the circuit designs perfected for recently introduced Quad Operational Amplifiers, these dual operational amplifiers feature 1) low power drain, 2) a common mode input voltage range extending to ground/V_{EE}, 3) single supply or split supply operation and 4) pinouts compatible with the popular MC1558 dual operational amplifier. The LM158 series is equivalent to one-half of an LM124.

These amplifiers have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. They can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V, with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

Short Circuit Protected Outputs

True Differential Input Stage

Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V

Low Input Bias Currents

Internally Compensated

Common Mode Range Extends to Negative Supply

Single and Split Supply Operation

Similar Performance to the Popular MC1558

ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness of the Device without

Affecting Operation

LM358, LM258, LM2904, LM2904V

DUAL DIFFERENTIAL INPUT OPERATIONAL AMPLIFIERS

SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA

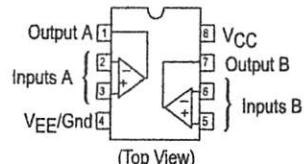


N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626



D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751
(SO-8)

PIN CONNECTIONS



ORDERING INFORMATION

Device	Operating Temperature Range	Package
LM2904D	T _A = -40° to +105°C	SO-8
LM2904N		Plastic DIP
LM2904VD	T _A = -40° to +125°C	SO-8
LM2904VN		Plastic DIP
LM258D	T _A = -25° to +85°C	SO-8
LM258N		Plastic DIP
LM358D	T _A = 0° to +70°C	SO-8
LM358N		Plastic DIP

OTES: 1. Split Power Supplies.

2. For Supply Voltages less than 32 V for the LM258/358 and 26 V for the LM2904, the absolute maximum input voltage is equal to the supply voltage.

LM358, LM258, LM2904, LM2904V

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 5.0$ V, $V_{EE} = \text{Gnd}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Characteristic	Symbol	LM258			LM358			LM2904			LM2904V			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Input Offset Voltage $V_{CC} = 5.0$ V to 30 V (26 V for LM2904, V), $V_{IC} = 0$ V to $V_{CC} - 1.7$ V, $V_O = 1.4$ V, $R_S = 0$ Ω $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ (Note 1) $T_A = T_{\text{low}}$ (Note 1)	V_{IO}	—	2.0	5.0	—	2.0	7.0	—	2.0	7.0	—	—	—	mV
—	—	—	7.0	—	—	—	9.0	—	—	10	—	—	13	
—	—	—	2.0	—	—	—	9.0	—	—	10	—	—	10	
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 1)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	7.0	—	—	7.0	—	—	7.0	—	—	7.0	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 1)	I_{IO}	—	3.0	30	—	5.0	50	—	5.0	50	—	5.0	50	nA
Input Bias Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 1)	I_{IB}	—	—	100	—	—	150	—	45	200	—	45	200	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 1)	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	—	10	—	—	10	—	—	10	—	—	10	—	pA/ $^\circ\text{C}$
Input Common Mode Voltage Range (Note 2) $V_{CC} = 30$ V (26 V for LM2904, V), $V_{CC} = 30$ V (26 V for LM2904, V), $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low}	V_{ICR}	0	—	28.3	0	—	28.3	0	—	24.3	0	—	24.3	V
0	—	28	0	—	28	0	—	24	0	—	24	—	—	
Differential Input Voltage Range	V_{IDR}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain $R_L = 2.0$ k Ω , $V_{CC} = 15$ V, For Large V_O Swing, $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 1)	A_{VOL}	50	100	—	25	100	—	25	100	—	25	100	—	V/mV
25	—	—	—	15	—	—	15	—	—	15	—	—	—	
Channel Separation 1.0 kHz $\leq f \leq 20$ kHz, Input Referenced	CS	—	-120	—	—	-120	—	—	-120	—	—	-120	—	dB
Common Mode Rejection $R_S \leq 10$ k Ω	CMR	70	85	—	65	70	—	50	70	—	50	70	—	dB
Power Supply Rejection	PSR	65	100	—	65	100	—	50	100	—	50	100	—	dB
Output Voltage-High Limit ($T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low}) (Note 1)	V_{OH}	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	V
$V_{CC} = 5.0$ V, $R_L = 2.0$ k Ω , $T_A = 25^\circ\text{C}$ $V_{CC} = 30$ V (26 V for LM2904, V), $R_L = 2.0$ k Ω $V_{CC} = 30$ V (26 V for LM2904, V), $R_L = 10$ k Ω		3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	
26	—	—	—	26	—	—	22	—	—	22	—	—	—	
27	28	—	—	27	28	—	23	24	—	23	24	—	—	
Output Voltage-Low Limit $V_{CC} = 5.0$ V, $R_L = 10$ k Ω , $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 1)	V_{OL}	—	5.0	20	—	5.0	20	—	5.0	20	—	5.0	20	mV
Output Source Current $V_{ID} = +1.0$ V, $V_{CC} = 15$ V	I_{O+}	20	40	—	20	40	—	20	40	—	20	40	—	mA
Output Sink Current $V_{ID} = -1.0$ V, $V_{CC} = 15$ V $V_{ID} = -1.0$ V, $V_O = 200$ mV	I_{O-}	10	20	—	10	20	—	10	20	—	10	20	—	mA
12	50	—	—	12	50	—	—	—	—	—	—	—	—	μA
Output Short Circuit to Ground (Note 3)	I_{SC}	—	40	60	—	40	60	—	40	60	—	40	60	mA
Power Supply Current ($T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low}) (Note 1)	I_{CC}	—	1.5	3.0	—	1.5	3.0	—	1.5	3.0	—	1.5	3.0	mA
$V_{CC} = 30$ V (26 V for LM2904, V), $V_O = 0$ V, $R_L = \infty$ $V_{CC} = 5$ V, $V_O = 0$ V, $R_L = \infty$		—	0.7	1.2	—	0.7	1.2	—	0.7	1.2	—	0.7	1.2	

NOTES: 1. $T_{\text{low}} = -40^\circ\text{C}$ for LM2904
= -40°C for LM2904V
= -25°C for LM258
= 0°C for LM358

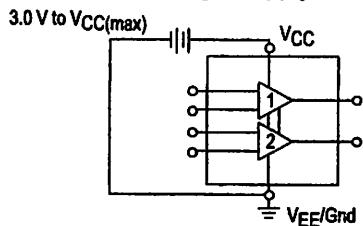
$T_{\text{high}} = +105^\circ\text{C}$ for LM2904
= $+125^\circ\text{C}$ for LM2904V
= $+85^\circ\text{C}$ for LM258
= $+70^\circ\text{C}$ for LM358

2. The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is $V_{CC} - 1.7$ V.

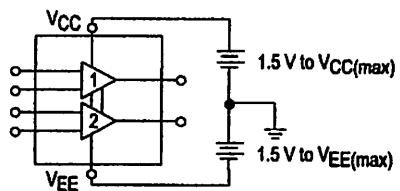
3. Short circuits from the output to V_{CC} can cause excessive heating and eventual destruction. Destructive dissipation can result from simultaneous shorts on all amplifiers.

LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Single Supply

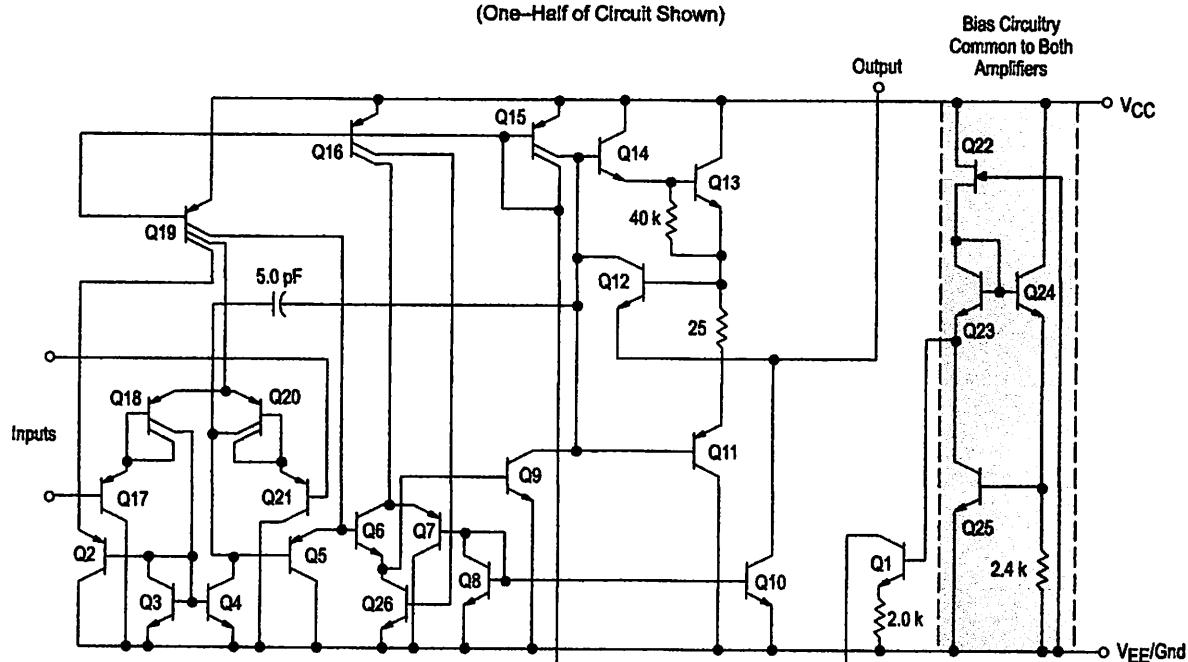


Split Supplies



Representative Schematic Diagram

(One-Half of Circuit Shown)

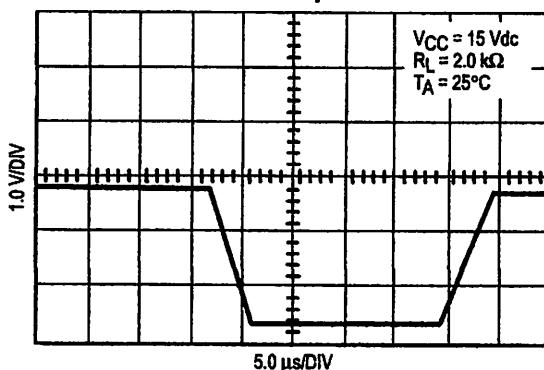


CIRCUIT DESCRIPTION

The LM258 series is made using two internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage of each consists of differential input devices Q20 and Q3 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also performs the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance, a smaller compensation capacitor (only 5.0 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input stages or the differential to single-ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

Each amplifier is biased from an internal-voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.

Large Signal Voltage Follower Response



LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Figure 1. Input Voltage Range

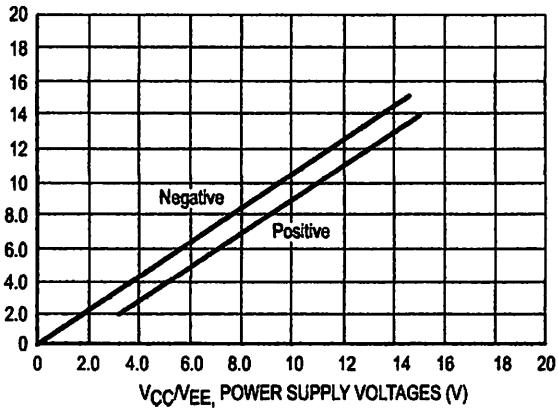


Figure 2. Large-Signal Open Loop Voltage Gain

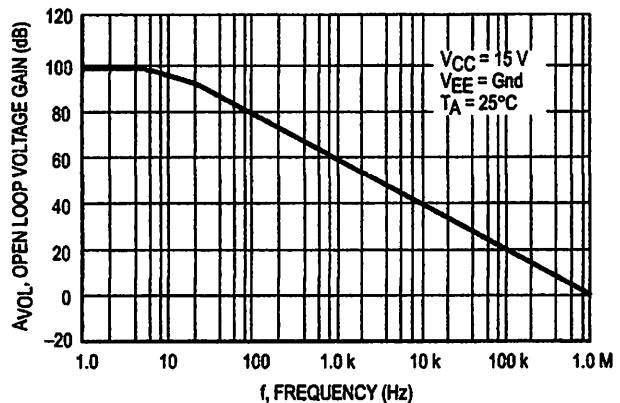


Figure 3. Large-Signal Frequency Response

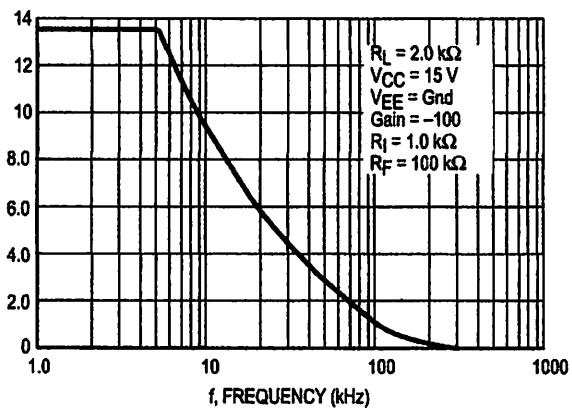


Figure 4. Small Signal Voltage Follower Pulse Response (Noninverting)

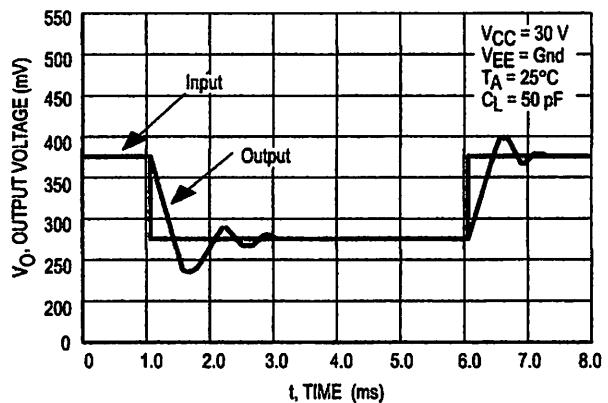


Figure 5. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

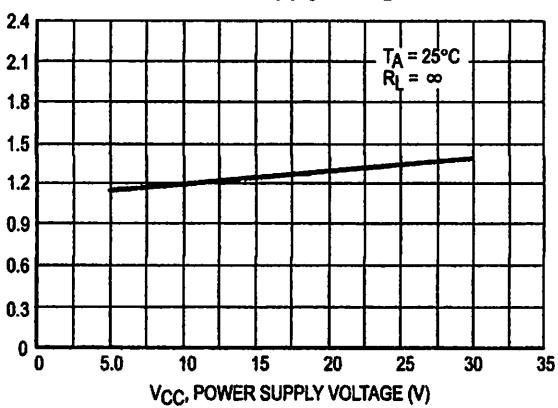
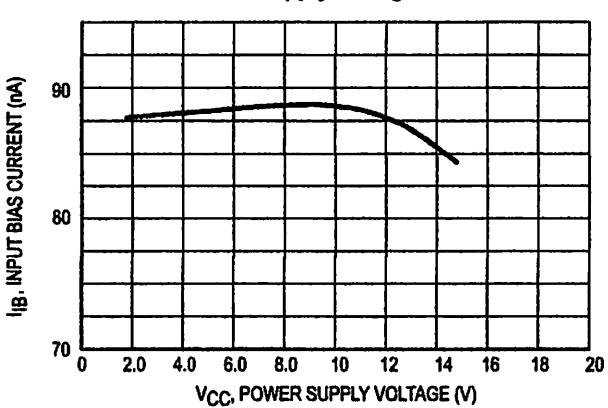


Figure 6. Input Bias Current versus Supply Voltage



LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Figure 7. Voltage Reference

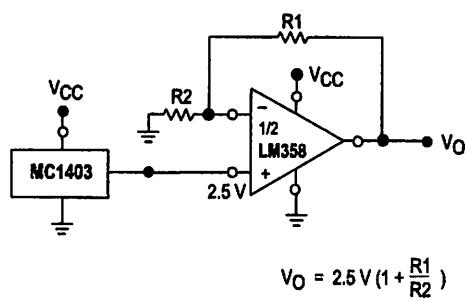


Figure 8. Wien Bridge Oscillator

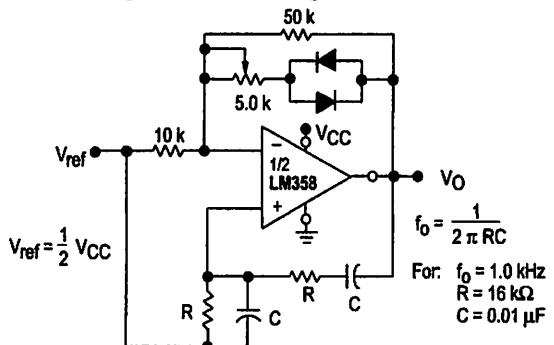


Figure 9. High Impedance Differential Amplifier

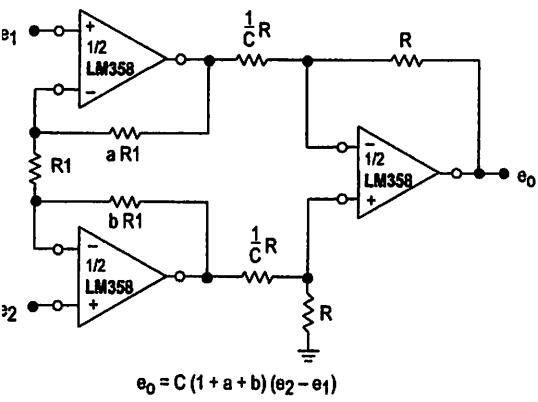


Figure 10. Comparator with Hysteresis

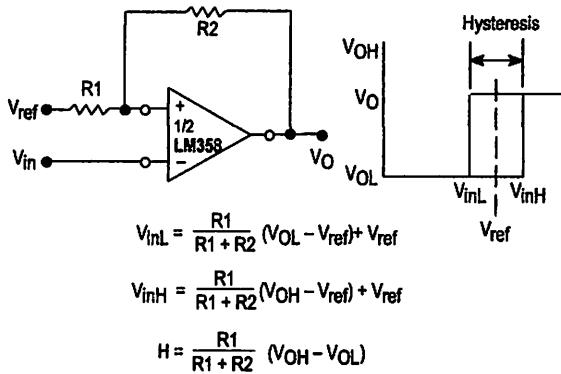
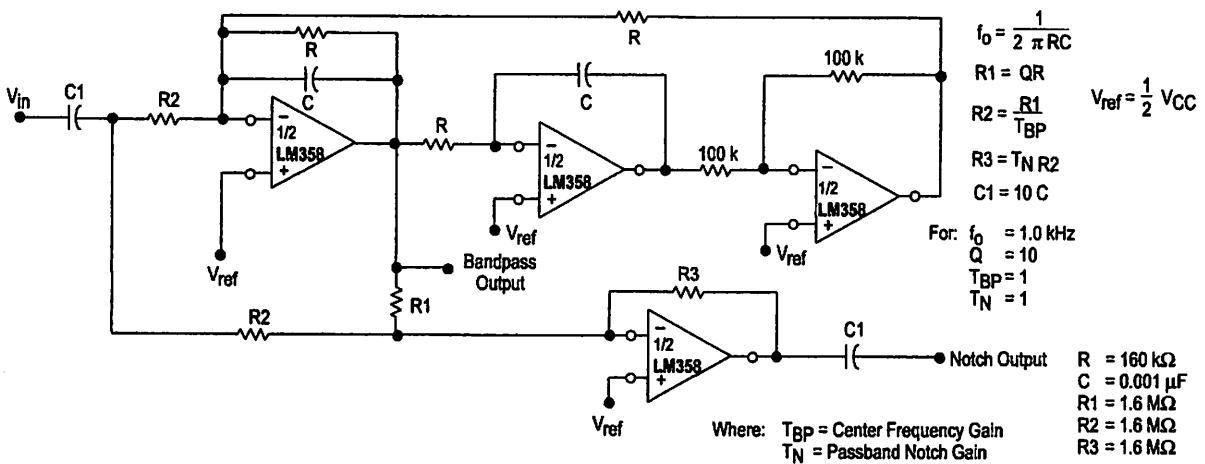


Figure 11. Bi-Quad Filter



LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Figure 12. Function Generator

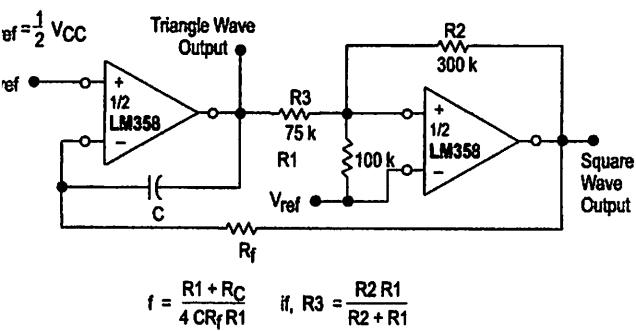
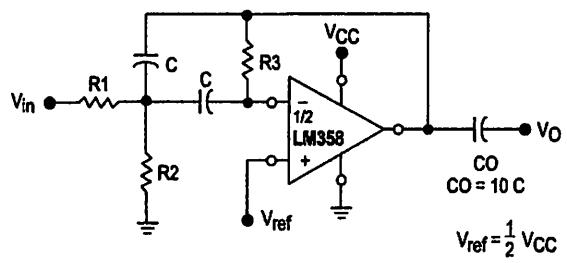


Figure 13. Multiple Feedback Bandpass Filter



Given: f_0 = center frequency
 $A(f_0)$ = gain at center frequency

Choose value f_0 , C

$$\text{Then: } R_3 = \frac{Q}{\pi f_0 C}$$

$$R_1 = \frac{R_3}{2 A(f_0)}$$

$$R_2 = \frac{R_1 R_3}{4 Q^2 R_1 - R_3}$$

For less than 10% error from operational amplifier. $\frac{Q_0 f_0}{BW} < 0.1$

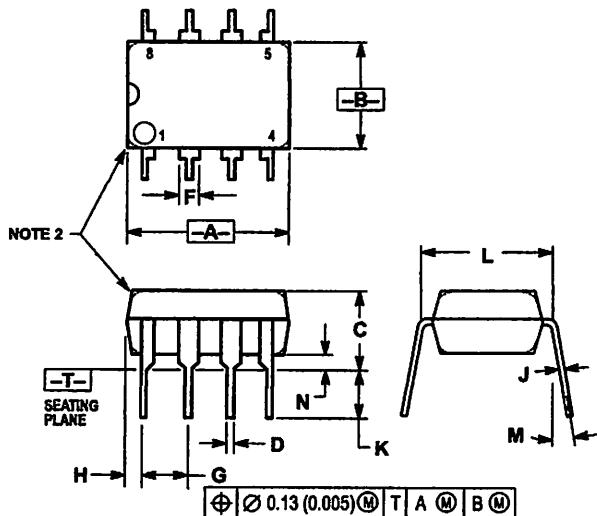
Where f_0 and BW are expressed in Hz.

If source impedance varies, filter may be preceded with voltage follower buffer to stabilize filter parameters.

LM358, LM258, LM2904, LM2904V

OUTLINE DIMENSIONS

N SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 626-05
ISSUE K

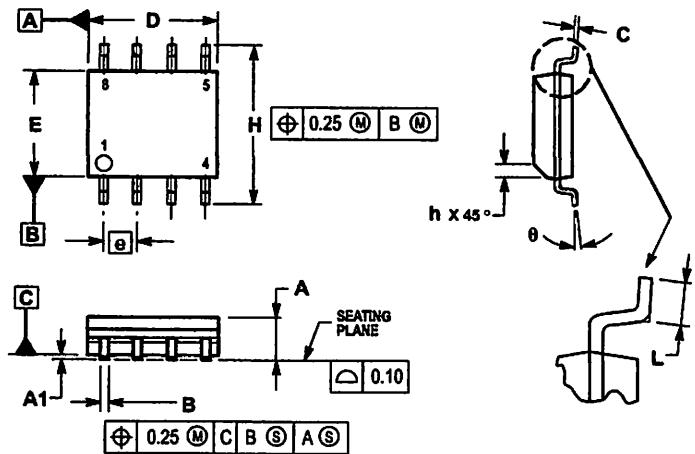


NOTES:

1. DIMENSION L TO CENTER OF LEAD WHEN FORMED PARALLEL.
2. PACKAGE CONTOUR OPTIONAL (ROUND OR SQUARE CORNERS).
3. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.

DIM	MILLIMETERS		INCHES	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	9.40	10.16	0.370	0.400
B	6.10	6.60	0.240	0.260
C	3.84	4.45	0.155	0.175
D	0.38	0.51	0.015	0.020
F	1.02	1.78	0.040	0.070
G	2.54 BSC		0.100 BSC	
H	0.76	1.27	0.030	0.050
J	0.20	0.30	0.008	0.012
K	2.92	3.43	0.115	0.135
L	7.62 BSC		0.300 BSC	
M	—	10°	—	10°
N	0.76	1.01	0.030	0.040

D SUFFIX
PLASTIC PACKAGE
CASE 751-05
(SO-8)
ISSUE R



NOTES:

1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ASME Y14.5M, 1994.
2. DIMENSIONS ARE IN MILLIMETERS.
3. DIMENSION D AND E DO NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION.
4. MAXIMUM MOLD PROTRUSION 0.15 PER SIDE.
5. DIMENSION B DOES NOT INCLUDE MOLD PROTRUSION. ALLOWABLE DAMBAR PROTRUSION SHALL BE 0.127 TOTAL IN EXCESS OF THE B DIMENSION AT MAXIMUM MATERIAL CONDITION.

DIM	MILLIMETERS	
	MIN	MAX
A	1.35	1.75
A1	0.10	0.25
B	0.35	0.49
C	0.18	0.25
D	4.60	5.00
E	3.60	4.00
e	1.27 BSC	
H	5.60	6.20
h	0.25	0.50
I	0.40	1.25
J	0.0	7.0

LM358, LM258, LM2904, LM2904V

Motorola reserves the right to make changes without further notice to any products herein. Motorola makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does Motorola assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in Motorola data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. Motorola does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. Motorola products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the Motorola product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use Motorola products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold Motorola and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees rising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that Motorola was negligent regarding the design or manufacture of the part. Motorola and  are registered trademarks of Motorola, Inc. Motorola, Inc. is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

How to reach us:

SA/EUROPE/Locations Not Listed: Motorola Literature Distribution;
O. Box 20912; Phoenix, Arizona 85036. 1-800-441-2447 or 602-303-5454

FAX: RMFAX0@email.sps.mot.com - TOUCHTONE 602-244-6609
INTERNET: <http://Design-NET.com>

JAPAN: Nippon Motorola Ltd.; Tatsumi-SPD-JLDC, 6F Seibu-Butsuryu-Center,
3-14-2 Tatsumi Koto-Ku, Tokyo 135, Japan. 03-81-3521-8315

ASIA/PACIFIC: Motorola Semiconductors H.K. Ltd.; 8B Tai Ping Industrial Park,
51 Ting Kok Road, Tai Po, N.T., Hong Kong. 852-26629298

MOTOROLA



LM358/D



LM741

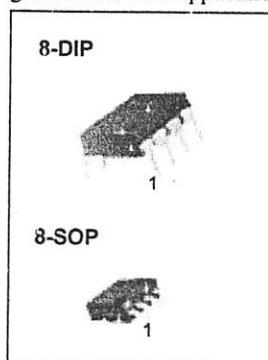
Single Operational Amplifier

Features

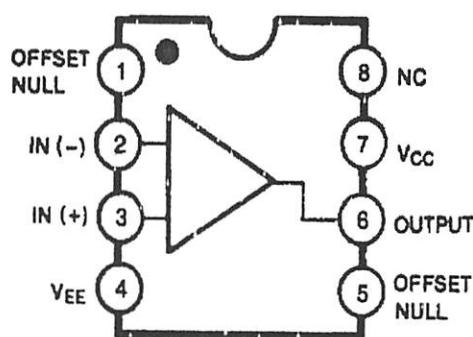
- Short circuit protection
- Excellent temperature stability
- Internal frequency compensation
- High Input voltage range
- Null of offset

Description

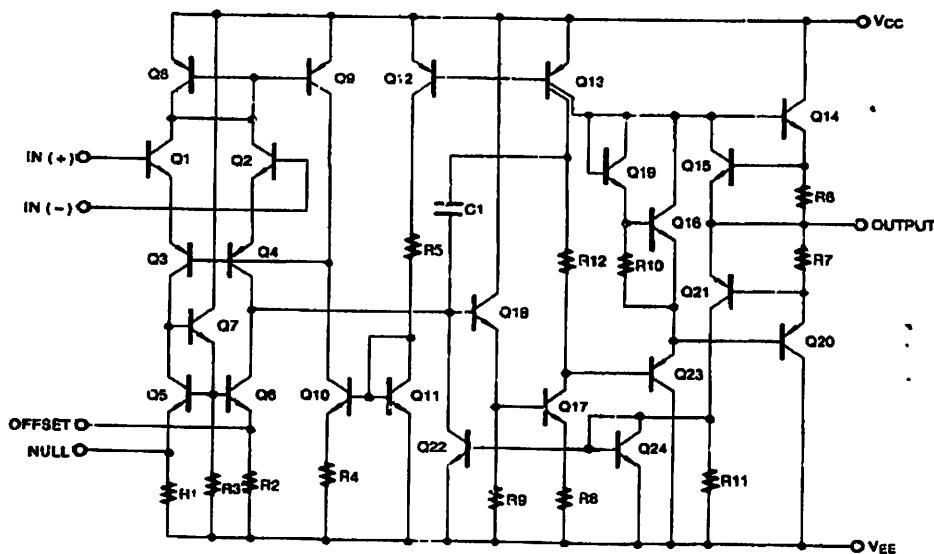
The LM741 series are general purpose operational amplifiers. It is intended for a wide range of analog applications. The high gain and wide range of operating voltage provide superior performance in integrator, summing amplifier, and general feedback applications.



Internal Block Diagram



Schematic Diagram



Absolute Maximum Ratings ($T_A = 25^\circ\text{C}$)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Supply Voltage	V _{CC}	± 18	V
Differential Input Voltage	V _{I(DIFF)}	30	V
Input Voltage	V _I	± 15	V
Output Short Circuit Duration	-	Indefinite	-
Power Dissipation	P _D	500	mW
Operating Temperature Range LM741C LM741I	TOPR	0 ~ +70 -40 ~ +85	°C
Storage Temperature Range	T _{STG}	-65 ~ +150	°C

Electrical Characteristics

(V_{CC} = 15V, V_{EE} = - 15V, T_A = 25 °C, unless otherwise specified)

Parameter	Symbol	Conditions	LM741C/LM741I			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V _{IO}	R _S ≤10KΩ	-	2.0	6.0	mV
		R _S ≤50Ω	-	-	-	
Input Offset Voltage Adjustment Range	V _{IO(R)}	V _{CC} = ±20V	-	±15	-	mV
Input Offset Current	I _{IO}	-	-	20	200	nA
Input Bias Current	I _{IBIAS}	-	-	80	500	nA
Input Resistance (Note1)	R _I	V _{CC} = ±20V	0.3	2.0	-	MΩ
Input Voltage Range	V _{I(R)}	-	±12	±13	-	V
Large Signal Voltage Gain	G _V	R _L ≥2KΩ	V _{CC} = ±20V, V _{O(P-P)} = ±15V	-	-	V/mV
			V _{CC} = ±15V, V _{O(P-P)} = ±10V	20	200	
Output Short Circuit Current	I _{SC}	-	-	25	-	mA
Output Voltage Swing	V _{O(P-P)}	V _{CC} = ±20V	R _L ≥10KΩ	-	-	V
			R _L ≥2KΩ	-	-	
		V _{CC} = ±15V	R _L ≥10KΩ	±12	±14	
			R _L ≥2KΩ	±10	±13	
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	R _S ≤10KΩ, V _{CM} = ±12V	-	90	-	dB
		R _S ≤50Ω, V _{CM} = ±12V	-	-	-	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	V _{CC} = ±15V to V _{CC} = ±15V R _S ≤50Ω	-	-	-	dB
		V _{CC} = ±15V to V _{CC} = ±15V R _S ≤10KΩ	77	96	-	
Transient Response	Rise Time	T _R	Unity Gain	-	0.3	μs
	Overshoot	OS		-	10	
Bandwidth		BW	-	-	-	MHz
Slew Rate		SR	Unity Gain	-	0.5	V/μs
Supply Current		I _{CC}	R _L = ∞Ω	-	1.5	2.8 mA
Power Consumption		P _C	V _{CC} = ±20V	-	-	mW
			V _{CC} = ±15V	-	50	85 mW

Note:

- Guaranteed by design.

Electrical Characteristics

($0^{\circ}\text{C} \leq \text{TA} \leq 70^{\circ}\text{C}$ $\text{VCC} = \pm 15\text{V}$, unless otherwise specified)

The following specification apply over the range of $0^{\circ}\text{C} \leq \text{TA} \leq +70^{\circ}\text{C}$ for the LM741C; and the $-40^{\circ}\text{C} \leq \text{TA} \leq +85^{\circ}\text{C}$ for the LM741I

Parameter	Symbol	Conditions	LM741C/LM741I			Unit
			Min.	Typ.	Max.	
Input Offset Voltage	V_{IO}	$R_S \leq 50\Omega$	-	-	-	mV
		$R_S \leq 10\text{K}\Omega$	-	-	7.5	
Input Offset Voltage Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	-	-	-	-	$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Input Offset Current	I_{IO}	-	-	-	300	nA
Input Offset Current Drift	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	-	-	-	-	$\text{nA}/^{\circ}\text{C}$
Input Bias Current	I_{BIAS}	-	-	-	0.8	μA
Input Resistance (Note1)	R_I	$\text{VCC} = \pm 20\text{V}$	-	-	-	$\text{M}\Omega$
Input Voltage Range	$V_{I(R)}$	-	± 12	± 13	-	V
Output Voltage Swing	$V_{O(P-P)}$	$\text{VCC} = \pm 20\text{V}$	$R_S \geq 10\text{K}\Omega$	-	-	V
			$R_S \geq 2\text{K}\Omega$	-	-	
		$\text{VCC} = \pm 15\text{V}$	$R_S \geq 10\text{K}\Omega$	± 12	± 14	
			$R_S \geq 2\text{K}\Omega$	± 10	± 13	
Output Short Circuit Current	I_{SC}	-	10	-	40	mA
Common Mode Rejection Ratio	CMRR	$\text{RS} \leq 10\text{K}\Omega$, $\text{V}_{CM} = \pm 12\text{V}$	70	90	-	dB
		$\text{RS} \leq 50\Omega$, $\text{V}_{CM} = \pm 12\text{V}$	-	-	-	
Power Supply Rejection Ratio	PSRR	$\text{VCC} = \pm 20\text{V}$ to $\pm 5\text{V}$	$\text{RS} \leq 50\Omega$	-	-	dB
			$\text{RS} \leq 10\text{K}\Omega$	77	96	
Large Signal Voltage Gain	G_V	$\text{RS} \geq 2\text{K}\Omega$	$\text{VCC} = \pm 20\text{V}$, $\text{VO}(P-P) = \pm 15\text{V}$	-	-	V/mV
			$\text{VCC} = \pm 15\text{V}$, $\text{VO}(P-P) = \pm 10\text{V}$	15	-	
			$\text{VCC} = \pm 15\text{V}$, $\text{VO}(P-P) = \pm 2\text{V}$	-	-	

Note :

1. Guaranteed by design.

Typical Performance Characteristics

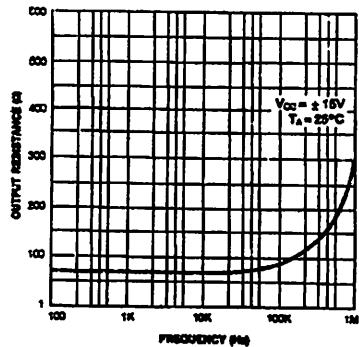


Figure 1. Output Resistance vs Frequency

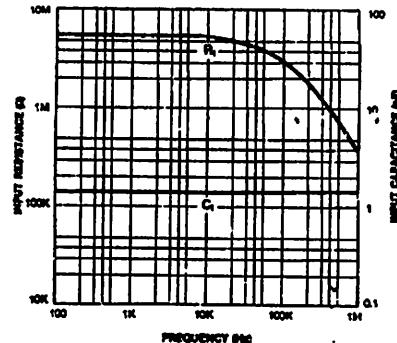


Figure 2. Input Resistance and Input Capacitance vs Frequency

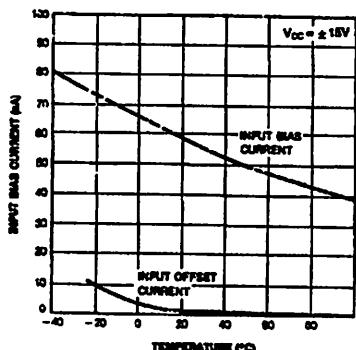


Figure 3. Input Bias Current vs Ambient Temperature

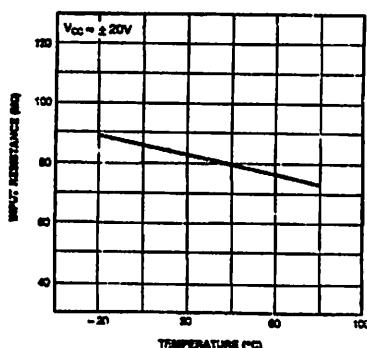


Figure 4. Power Consumption vs Ambient Temperature

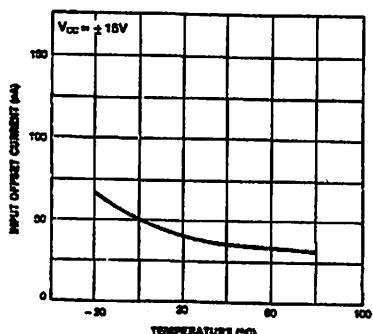


Figure 5. Input Offset Current vs Ambient Temperature

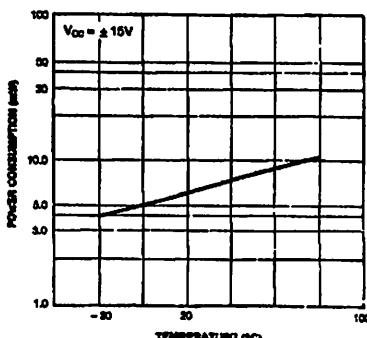


Figure 6. Input Resistance vs Ambient Temperature

Typical Performance Characteristics (continued)

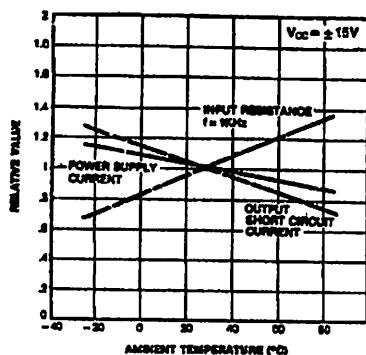


Figure 7. Normalized DC Parameters vs Ambient Temperature

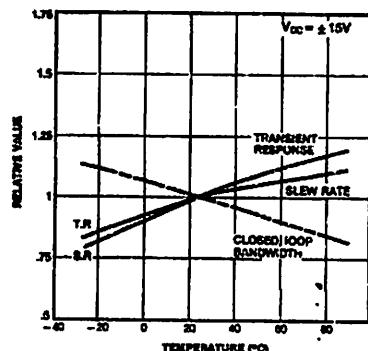


Figure 8. Frequency Characteristics vs Ambient Temperature

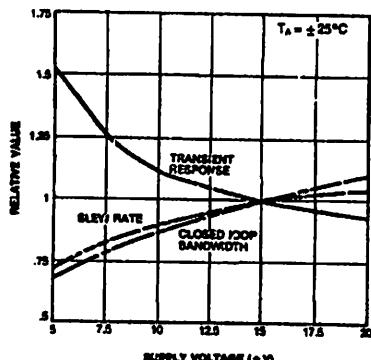


Figure 9. Frequency Characteristics vs Supply Voltage

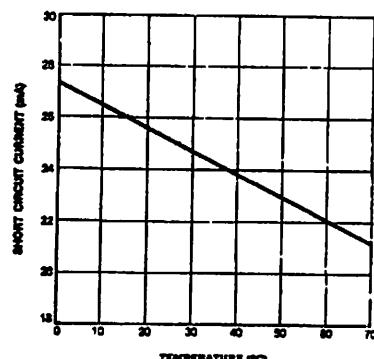


Figure 10. Output Short Circuit Current vs Ambient Temperature

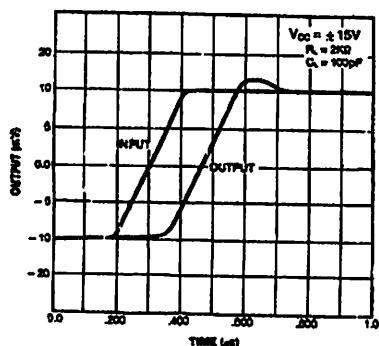


Figure 11. Transient Response

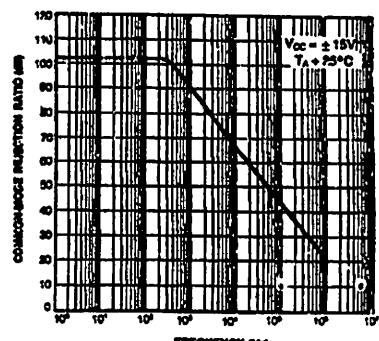


Figure 12. Common-Mode Rejection Ratio vs Frequency

Typical Performance Characteristics (continued)

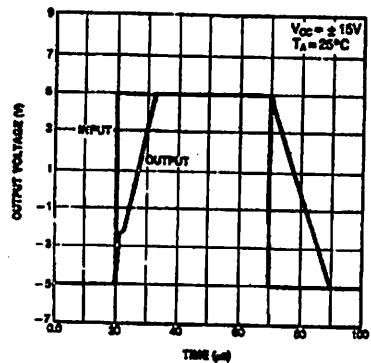


Figure 13. Voltage Follower Large Signal Pulse Response

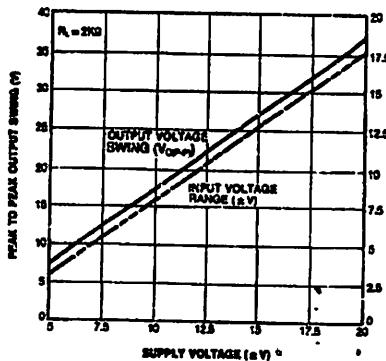
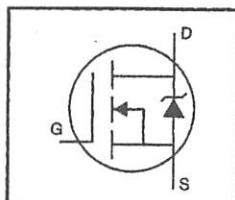


Figure 14. Output Swing and Input Range vs Supply Voltage

HEXFET® Power MOSFET

- Dynamic dv/dt Rating
- Repetitive Avalanche Rated
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Ease of Paralleling
- Simple Drive Requirements

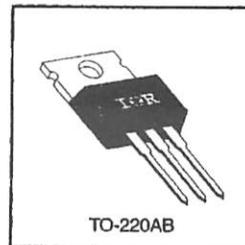


$V_{DSS} = 100V$
 $R_{DS(on)} = 0.077\Omega$
 $I_D = 28A$

Description

Third Generation HEXFETs from International Rectifier provide the designer with the best combination of fast switching, ruggedized device design, low on-resistance and cost-effectiveness.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



DATA SHEETS

Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	28	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10 V$	20	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ①	110	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	150	W
V_{GS}	Linear Derating Factor	1.0	W/C
E_{AS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Single Pulse Avalanche Energy ②	230	mJ
E_{AR}	Avalanche Current ①	28	A
dv/dt	Repetitive Avalanche Energy ①	15	mJ
T_J	Peak Diode Recovery dv/dt ③	5.5	V/ns
T_{STG}	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to +175	°C
Soldering Temperature, for 10 seconds	300 (1.6mm from case)		
Mounting Torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf·in (1.1 N·m)		

Thermal Resistance

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units
$R_{a/C}$	Junction-to-Case	—	—	1.0	°C/W
$R_{e/cs}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	—	0.50	—	
$R_{e/A}$	Junction-to-Ambient	—	—	62	

IRF540



Electrical Characteristics @ $T_J = 25^\circ\text{C}$ (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
$V_{(BR)DSS}$	Drain-to-Source Breakdown Voltage	100	—	—	V	$V_{GS}=0\text{V}$, $I_D=250\mu\text{A}$
$\Delta V_{(BR)DSS}/\Delta T_J$	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.13	—	V/ $^\circ\text{C}$	Reference to 25°C , $I_D=1\text{mA}$
$R_{DS(on)}$	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	0.077	Ω	$V_{GS}=10\text{V}$, $I_D=17\text{A}$ ①
$V_{GS(th)}$	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	$V_{DS}=V_{GS}$, $I_D=250\mu\text{A}$
g_F	Forward Transconductance	8.7	—	—	S	$V_{DS}=50\text{V}$, $I_D=17\text{A}$ ①
I_{SS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	$V_{DS}=100\text{V}$, $V_{GS}=0\text{V}$
		—	—	250		$V_{DS}=80\text{V}$, $V_{GS}=0\text{V}$, $T_J=150^\circ\text{C}$
I_{GS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	$V_{GS}=20\text{V}$
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		$V_{GS}=-20\text{V}$
Q_g	Total Gate Charge	—	—	72	nC	$I_D=17\text{A}$
Q_{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	11		$V_{DS}=80\text{V}$
Q_{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	32		$V_{GS}=10\text{V}$ See Fig. 6 and 13 ②
$t_{ON(on)}$	Turn-On Delay Time	—	11	—		
t_r	Rise Time	—	44	—	ns	$V_{DD}=50\text{V}$
$t_{OFF(off)}$	Turn-Off Delay Time	—	53	—		$I_D=17\text{A}$
t_f	Fall Time	—	43	—		$R_G=9.1\Omega$
L_D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6 mm (0.25in.) from package and center of die contact
L_S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C_{iss}	Input Capacitance	—	1700	—	pF	$V_{GS}=0\text{V}$
C_{oss}	Output Capacitance	—	560	—		$V_{GS}=25\text{V}$
C_{trs}	Reverse Transfer Capacitance	—	120	—		$f=1.0\text{MHz}$ See Figure 5

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Test Conditions
I_S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	28		MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode.
I_{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode) ①	—	—	110	A	
V_{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	2.5	V	$T_J=25^\circ\text{C}$, $I_S=28\text{A}$, $V_{GS}=0\text{V}$ ②
t_{rr}	Reverse Recovery Time	—	180	360	ns	$T_J=25^\circ\text{C}$, $I_F=17\text{A}$
Q_{rr}	Reverse Recovery Charge	—	1.3	2.8	μC	$dI/dt=100\text{A}/\mu\text{s}$ ③
t_{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L_S+L_D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature (See Figure 11)
- ② $I_{SD}\leq 28\text{A}$, $dI/dt\leq 170\text{A}/\mu\text{s}$, $V_{DD}\leq V_{(BR)DSS}$, $T_J\leq 175^\circ\text{C}$
- ③ $V_{DD}=25\text{V}$, starting $T_J=25^\circ\text{C}$, $L=440\mu\text{H}$, $R_G=25\Omega$, $I_A=28\text{A}$ (See Figure 12)
- ④ Pulse width $\leq 300\ \mu\text{s}$; duty cycle $\leq 2\%$.

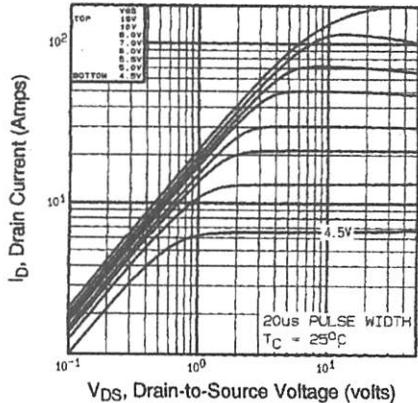


Fig 1. Typical Output Characteristics,
 $T_c = 25^\circ\text{C}$

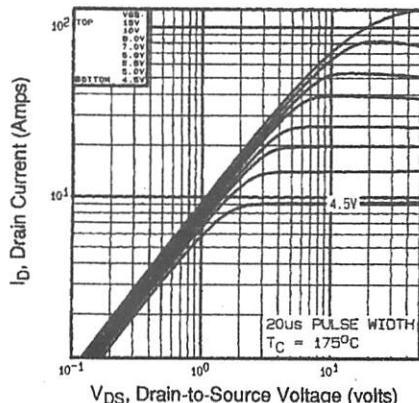


Fig 2. Typical Output Characteristics,
 $T_c = 175^\circ\text{C}$

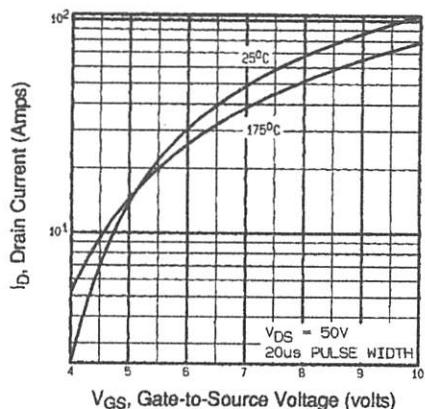


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

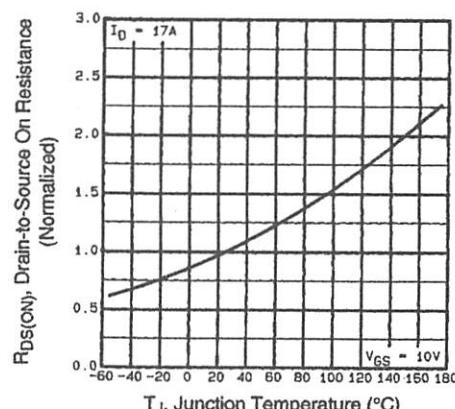


Fig 4. Normalized On-Resistance
Vs. Temperature

IRF540

IGR

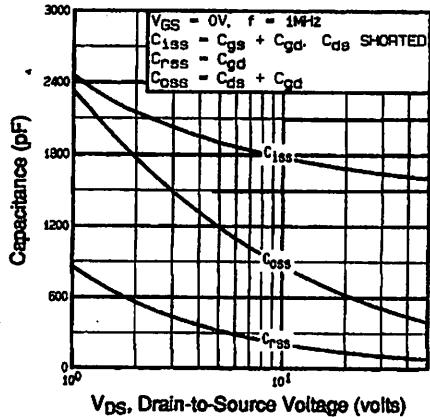


Fig 5. Typical Capacitance Vs.
Drain-to-Source Voltage

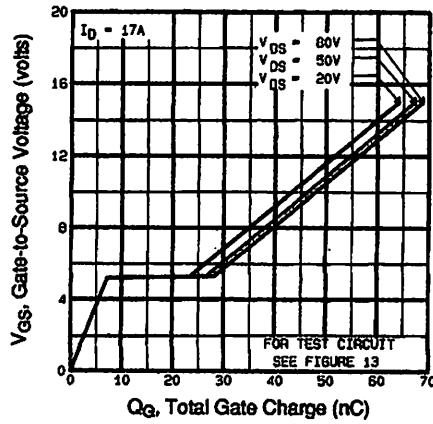


Fig 6. Typical Gate Charge Vs.
Gate-to-Source Voltage

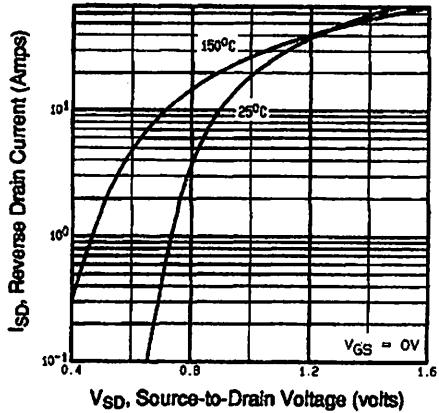


Fig 7. Typical Source-Drain Diode
Forward Voltage

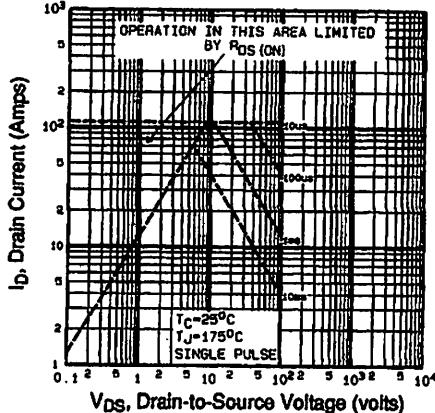


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

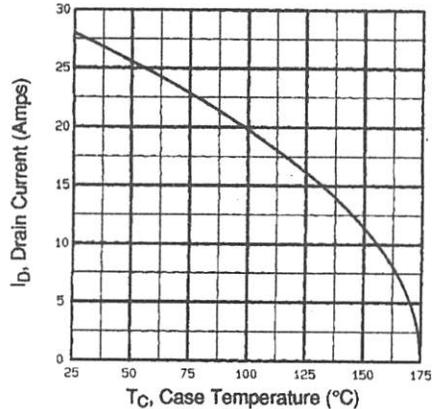


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

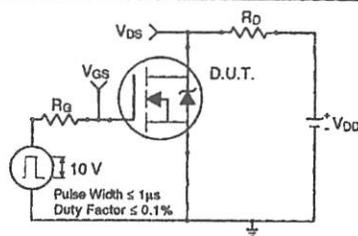
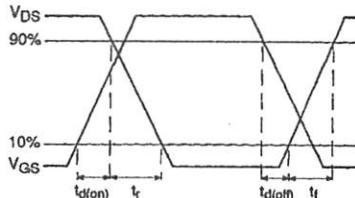


Fig 10a. Switching Time Test Circuit



DATA SHEETS

Fig 10b. Switching Time Waveforms

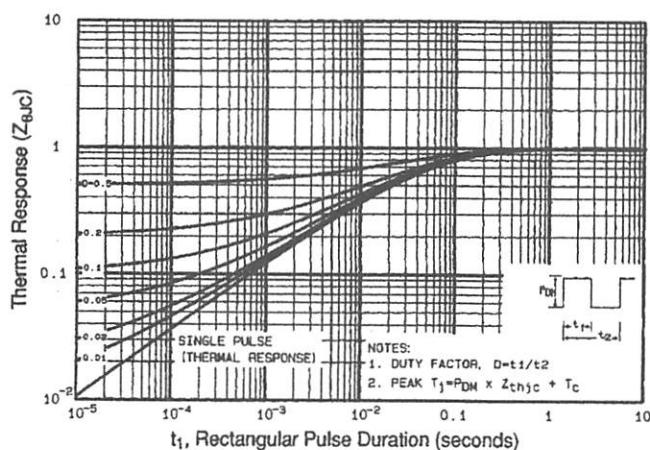


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRF540

IGR

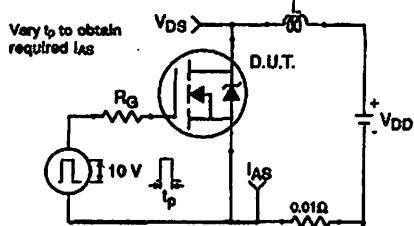


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

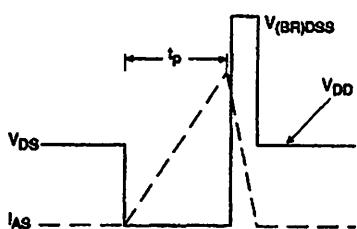


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

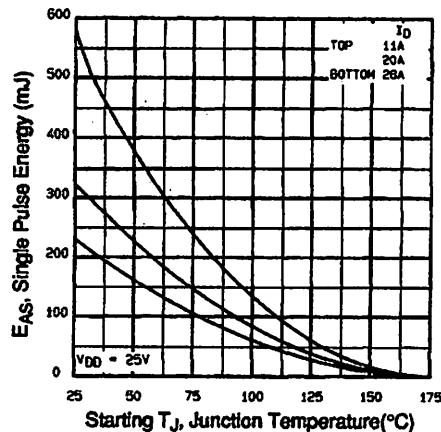


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

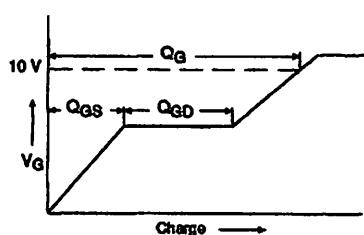


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

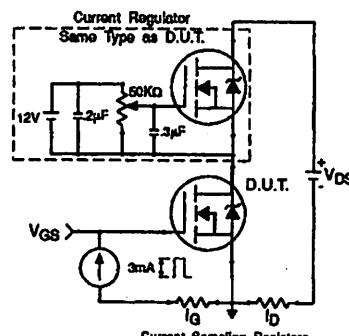


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Appendix A: Figure 14, Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit – See page 1505

Appendix B: Package Outline Mechanical Drawing – See page 1509

Appendix C: Part Marking Information – See page 1516

Appendix E: Optional Leadforms – See page 1525

International
IGR Rectifier

LM324, LM324A, LM224, LM2902, LM2902V, NCV2902

Single Supply Quad Operational Amplifiers

The LM324 series are low-cost, quad operational amplifiers with differential inputs. They have several distinct advantages over standard operational amplifier types in single supply applications. The quad amplifier can operate at supply voltages as low as 3.0 V or as high as 32 V with quiescent currents about one-fifth of those associated with the MC1741 (on a per amplifier basis). The common mode input range includes the negative supply, thereby eliminating the necessity for external biasing components in many applications. The output voltage range also includes the negative power supply voltage.

Short Circuited Protected Outputs

True Differential Input Stage

Single Supply Operation: 3.0 V to 32 V (LM224, LM324, LM324A)

Low Input Bias Currents: 100 nA Maximum (LM324A)

Four Amplifiers Per Package

Internally Compensated

Common Mode Range Extends to Negative Supply

Industry Standard Pinouts

ESD Clamps on the Inputs Increase Ruggedness without Affecting Device Operation

MAXIMUM RATINGS ($T_A = +25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

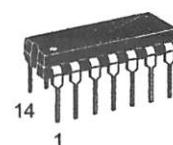
Rating	Symbol	LM224 LM324, LM324A	LM2902, LM2902V	Unit
Power Supply Voltages				
Single Supply	V_{CC}	32	26	Vdc
Split Supplies	V_{CC}, V_{EE}	± 16	± 13	
Input Differential Voltage Range (Note 1)	V_{IDR}	± 32	± 26	Vdc
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICR}	-0.3 to 32	-0.3 to 26	Vdc
Output Short Circuit Duration	t_{SC}	Continuous		
Junction Temperature	T_J	150		$^\circ\text{C}$
Storage Temperature Range	T_{stg}	-65 to +150		$^\circ\text{C}$
Operating Ambient Temperature Range	T_A			$^\circ\text{C}$
LM224		-25 to $+85$		
LM324, 324A		0 to $+70$		
LM2902		-40 to $+105$		
LM2902V, NCV2902		-40 to $+125$		

Split Power Supplies.



ON Semiconductor®

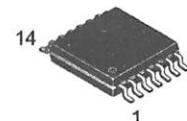
<http://onsemi.com>



PDIP-14
N SUFFIX
CASE 646

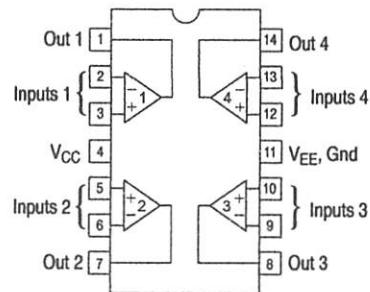


SO-14
D SUFFIX
CASE 751A



TSSOP-14
DTB SUFFIX
CASE 948G

PIN CONNECTIONS



(Top View)

ORDERING INFORMATION

See detailed ordering and shipping information in the package dimensions section on page 9 of this data sheet.

DEVICE MARKING INFORMATION

See general marking information in the device marking section on page 10 of this data sheet.

LM324, LM324A, LM224, LM2902, LM2902V, NCV2902

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 5.0$ V, $V_{EE} = \text{Gnd}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	LM224			LM324A			LM324			LM2902			LM2902V/NCV2902			Unit	
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max		
Input Offset Voltage $V_{CC} = 5.0$ V to 30 V 26 V for LM2902, V), $V_{ICR} = 0$ V to $V_{CC} - 1.7$ V, $V_O = 1.4$ V, $R_S = 0 \Omega$ $T = 25^\circ\text{C}$ $T = T_{high}$ (Note 2) $T = T_{low}$ (Note 2)	V_{IO}	—	2.0	5.0	—	2.0	3.0	—	2.0	7.0	—	2.0	7.0	—	2.0	7.0	mV	
—	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	7.0	—	—	7.0	30	—	7.0	—	—	7.0	—	—	7.0	—	$\mu\text{V}/^\circ\text{C}$	
Average Temperature Coefficient of Input Offset Voltage $T = T_{high}$ to T_{low} Notes 2 and 4)	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	—	10	—	—	10	300	—	10	—	—	10	—	—	10	—	pA/ $^\circ\text{C}$	
Input Offset Current $T = T_{high}$ to T_{low} Notes 2)	I_{IO}	—	3.0	30	—	5.0	30	—	5.0	50	—	5.0	50	—	5.0	50	nA	
—	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	—	—	100	—	—	75	—	—	150	—	—	200	—	—	200	—	nA
Average Temperature Coefficient of Input Offset Current $T = T_{high}$ to T_{low} Notes 2 and 4)	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	—	10	—	—	10	300	—	10	—	—	10	—	—	10	—	pA/ $^\circ\text{C}$	
Input Bias Current $T = T_{high}$ to T_{low} Notes 2)	I_B	—	—90	-150	—	-45	-100	—	-90	-250	—	-80	-250	—	-80	-250	nA	
—	V_{ICR}	—	—	-300	—	—	-200	—	—	-500	—	—	-500	—	—	-500	—	nA
Input Common Mode Voltage Range Note 3) $V_{CC} = 30$ V 26 V for LM2902, V) $T = +25^\circ\text{C}$ $T = T_{high}$ to T_{low} Notes 2)	V_{ICR}	0	—	28.3	0	—	28.3	0	—	28.3	0	—	24.3	0	—	24.3	—	V
0	V_{ICR}	0	—	28	0	—	28	0	—	28	0	—	24	0	—	24	—	V
Differential Input Voltage Range	V_{IDR}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	—	—	V_{CC}	—	V
Large Signal Open Loop Voltage Gain $R_s = 2.0 \text{ k}\Omega$, $V_{CC} = 15$ V, or Large V_O Swing $T = T_{high}$ to T_{low} Notes 2)	A_{VOL}	50	100	—	25	100	—	25	100	—	25	100	—	25	100	—	V/mV	
—	A_{VOL}	25	—	—	15	—	—	15	—	—	15	—	—	15	—	—	V/mV	
Channel Separation $0 \text{ kHz} \leq f \leq 20 \text{ kHz}$, Input Referenced	CS	—	-120	—	—	-120	—	—	-120	—	—	-120	—	—	-120	—	dB	
Common Mode Rejection, $R_S \leq 10 \text{ k}\Omega$	CMR	70	85	—	65	70	—	65	70	—	50	70	—	50	70	—	dB	
Power Supply Rejection	PSR	65	100	—	65	100	—	65	100	—	50	100	—	50	100	—	dB	

LM224: $T_{low} = -25^\circ\text{C}$, $T_{high} = +85^\circ\text{C}$

LM324/LM324A: $T_{low} = 0^\circ\text{C}$, $T_{high} = +70^\circ\text{C}$

LM2902: $T_{low} = -40^\circ\text{C}$, $T_{high} = +105^\circ\text{C}$

LM2902V & NCV2902: $T_{low} = -40^\circ\text{C}$, $T_{high} = +125^\circ\text{C}$

NCV2902 is qualified for automotive use.

The input common mode voltage or either input signal voltage should not be allowed to go negative by more than 0.3 V. The upper end of the common mode voltage range is $V_{CC} - 1.7$ V.

Guaranteed by design.

LM324, LM324A, LM224, LM2902, LM2902V, NCV2902

LECTRICAL CHARACTERISTICS ($V_{CC} = 5.0$ V, $V_{EE} = \text{Gnd}$, $T_A = 25^\circ\text{C}$, unless otherwise noted.)

Characteristics	Symbol	LM224			LM324A			LM324			LM2902			LM2902V/NCV2902			Unit
		Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	Min	Typ	Max	
Output Voltage— High Limit ($T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low}) (Note 5)	V_{OH}	3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	3.3	3.5	—	V
		26	—	—	26	—	—	26	—	—	22	—	—	22	—	—	
		27	28	—	27	28	—	27	28	—	23	24	—	23	24	—	
Output Voltage — Low Limit, $V_{CC} = 5.0$ V, $R_L = 10$ k Ω , $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 5)	V_{OL}	—	5.0	20	—	5.0	20	—	5.0	20	—	5.0	100	—	5.0	100	mV
Output Source Current $I_D = +1.0$ V, $V_{CC} = 15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 5)	I_{O+}	20	40	—	20	40	—	20	40	—	20	40	—	20	40	—	mA
		10	20	—	10	20	—	10	20	—	10	20	—	10	20	—	
Output Sink Current $I_D = -1.0$ V, $V_{CC} = 15$ V, $T_A = 25^\circ\text{C}$ $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 5)	I_{O-}	10	20	—	10	20	—	10	20	—	10	20	—	10	20	—	mA
Output Short Circuit to Ground (Note 6)	I_{SC}	—	40	60	—	40	60	—	40	60	—	40	60	—	40	60	mA
Power Supply Current $T_A = T_{\text{high}}$ to T_{low} (Note 5)	I_{CC}	—	—	3.0	—	1.4	3.0	—	—	3.0	—	—	3.0	—	—	3.0	mA

LM224: $T_{\text{low}} = -25^\circ\text{C}$, $T_{\text{high}} = +85^\circ\text{C}$

C

M

3

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

—

LM324, LM324A, LM224, LM2902, LM2902V, NCV2902

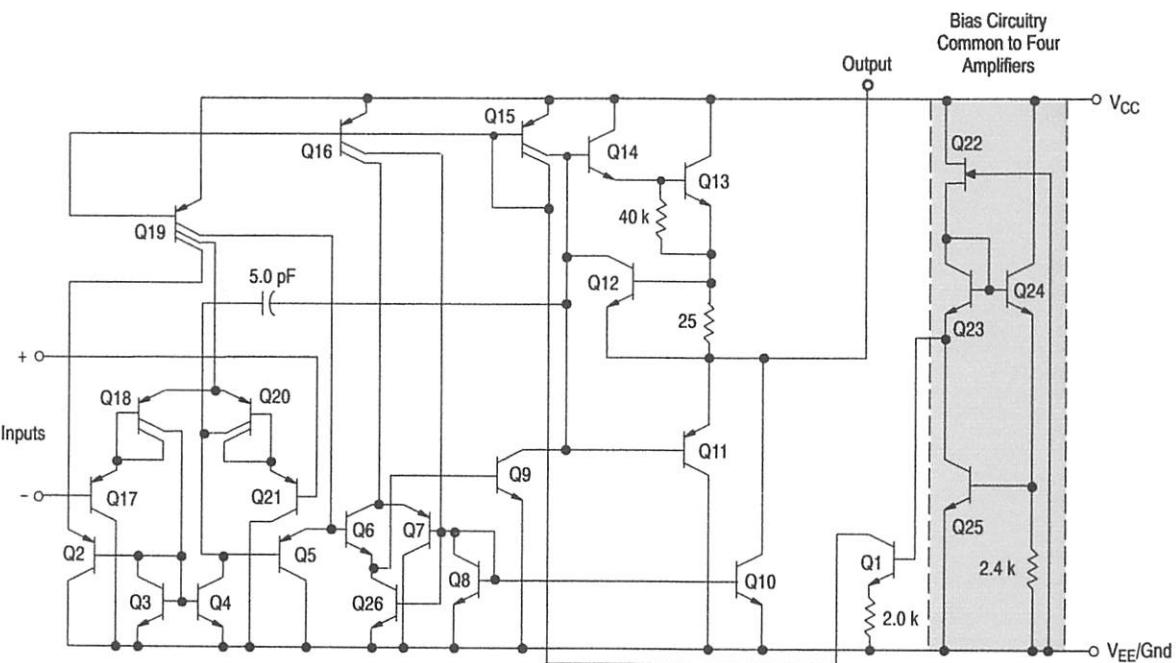


Figure 1. Representative Circuit Diagram
(One–Fourth of Circuit Shown)

LM324, LM324A, LM224, LM2902, LM2902V, NCV2902

CIRCUIT DESCRIPTION

The LM324 series is made using four internally compensated, two-stage operational amplifiers. The first stage of each consists of differential input devices Q20 and Q8 with input buffer transistors Q21 and Q17 and the differential to single ended converter Q3 and Q4. The first stage performs not only the first stage gain function but also forms the level shifting and transconductance reduction functions. By reducing the transconductance, a smaller compensation capacitor (only 5.0 pF) can be employed, thus saving chip area. The transconductance reduction is accomplished by splitting the collectors of Q20 and Q18. Another feature of this input stage is that the input common mode range can include the negative supply or ground, in single supply operation, without saturating either the input devices or the differential to single-ended converter. The second stage consists of a standard current source load amplifier stage.

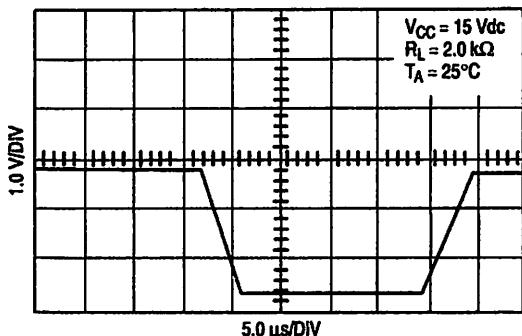
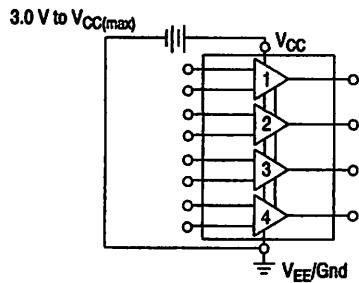
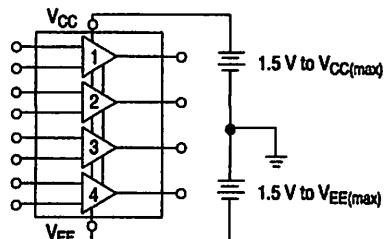


Figure 2. Large Signal Voltage Follower Response

Each amplifier is biased from an internal-voltage regulator which has a low temperature coefficient thus giving each amplifier good temperature characteristics as well as excellent power supply rejection.



Single Supply



Split Supplies

Figure 3.

LM324, LM324A, LM224, LM2902, LM2902V, NCV2902

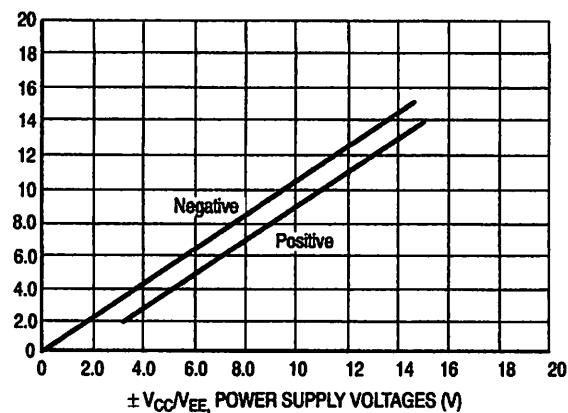


Figure 4. Input Voltage Range

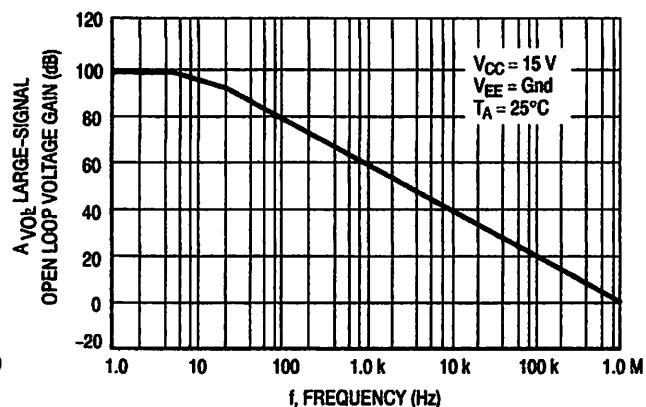


Figure 5. Open Loop Frequency

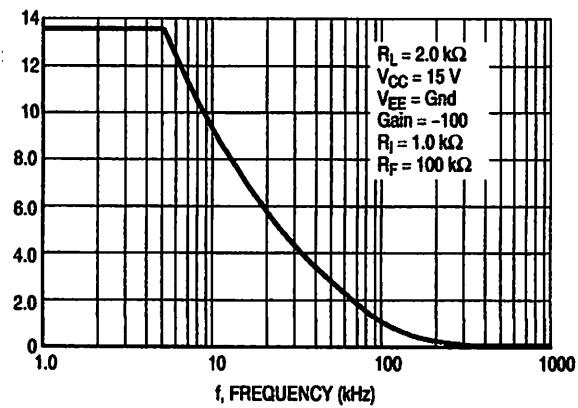


Figure 6. Large-Signal Frequency Response

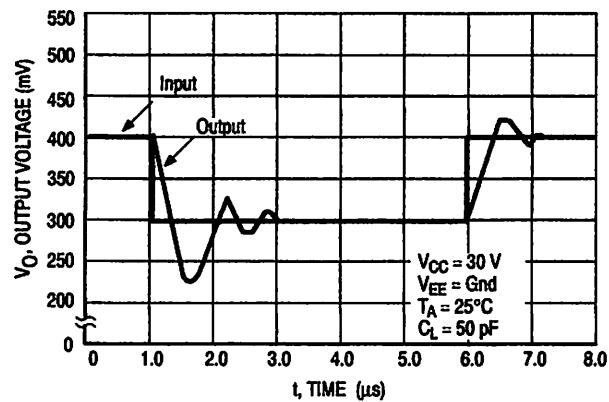


Figure 7. Small-Signal Voltage Follower Pulse Response (Noninverting)

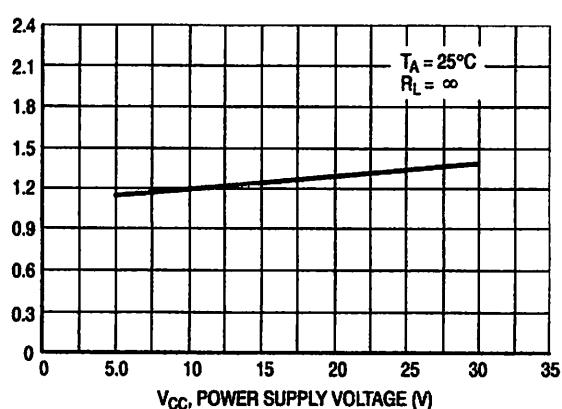


Figure 8. Power Supply Current versus Power Supply Voltage

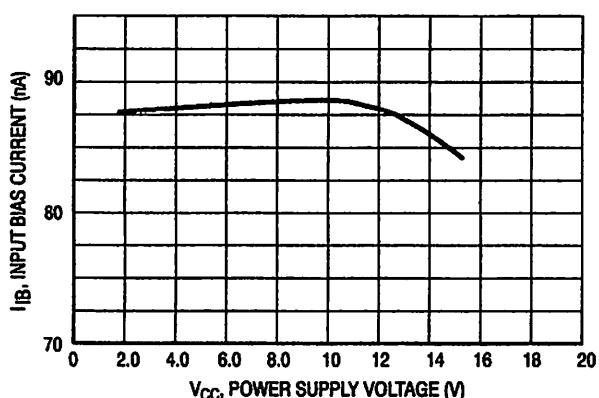


Figure 9. Input Bias Current versus Power Supply Voltage