

IMPLEMENTASI KONTROLER PID PADA AVR (AUTOMATIC VOLTAGE REGULATOR) UNTUK PENGATURAN TEGANGAN EKSTIASI GENERATOR SINKRON 3 FASA

Arman Jaya¹, Irianto², Amin Setiadji³

¹ Dosen Jurusan Teknik Elektro Industri

² Dosen Jurusan Teknik Elektro Industri

³ Mahasiswa D4 Jurusan Teknik Elektro Industri

Politeknik Elektronika Negeri Surabaya – ITS

Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Email : amin_setiadji@yahoo.co.id

Abstrak

Dalam pembangkitan tenaga listrik, kestabilan tegangan merupakan hal yang sangat penting untuk diperhatikan karena dapat mempengaruhi sistem kelistrikan. Perubahan tegangan keluaran sebuah generator dipengaruhi oleh berbagai macam faktor diantaranya adalah beban dinamis dan tegangan penguat magnet (tegangan eksitasi). Dalam proyek akhir ini dibuat suatu sistem pengaturan tegangan eksitasi generator sinkron 3 fasa untuk menjaga kestabilan tegangan generator sesuai ratingnya sebesar 380 volt. Dengan mengimplementasikan kontroler PID maka besar kecilnya tegangan eksitasi dapat diatur melalui perubahan duty cycle dari PWM untuk switching IGBT pada rangkaian daya DC-DC converter jenis buck-boost converter. Dengan parameter kontroler PID $K_p=3$, $K_i=0.001$, $K_d=0.001$ dan tegangan eksitasi yang mampu diberikan rangkaian daya sampai sebesar 130 volt dc sistem dapat stabil saat terjadi perubahan beban. Recovery time untuk mencapai steady state adalah 1,3 detik saat dibebani dan 1,1 detik saat beban dilepas.

Kata Kunci : Kontroler PID, Generator Sinkron 3 Fasa, Tegangan eksitasi, Buck-Boost Converter, Dutycycle

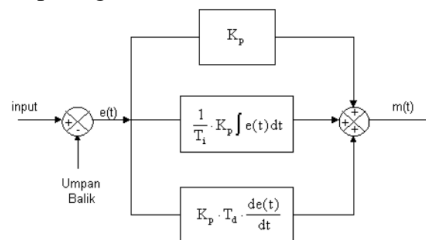
PENDAHULUAN

Masalah utama dari pembangkitan tenaga listrik adalah tegangan keluaran generator yang berubah-ubah yang diakibatkan oleh perubahan pembebanan pada generator. Dalam sistem interkoneksi skala besar, alat penstabil tegangan manual tidak pernah dipakai dan sebagai gantinya dipasang sebuah peralatan penstabil tegangan otomatis yang dinamakan AVR (Automatic Voltage Regulator) disetiap generator. Penggunaan AVR tidak terlepas dari keunggulan dalam hal kehandalan selain kemudahan dalam perancangan dan implementasinya.

Dengan berdasar pada kondisi seperti itu maka dalam paper ini dilakukan pembuatan suatu sistem pengaturan tegangan generator otomatis (AVR/Automatic Voltage Regulator) dengan kontrol PID yang bereferensi pada sistem tiga fasa untuk mengatur tegangan eksitasi yang akan diinjeksikan pada kumparan medan. Jika beban pada terminal keluaran generator ditambah, tegangan terminal keluaran generator akan turun. Dengan turunnya tegangan terminal keluaran generator maka secara otomatis dengan cepat AVR (Automatic Voltage Regulator) ini akan menaikkan tegangan eksitasi yang selanjutnya diinjeksikan ke kumparan medan yang bertujuan untuk menaikkan tegangan terminal keluaran generator dengan maksud untuk menyetabilkan tegangan keluaran agar sesuai dengan tegangan setting point.

KONTROLLER PID

Pengendali PID adalah sistem pengendali gabungan antara pengendali Proporsional integrator dan diferensial. Diagram blok pengendali PID dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 1. Blok diagram pengendali PID

Dalam waktu kontinyu, sinyal keluaran pengendali PID dirumuskan sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt}$$

dengan :

$u(t)$ = sinyal keluaran pengendali PID

K_p = konstanta proporsional

T_i = waktu integral

K_i = konstanta integral

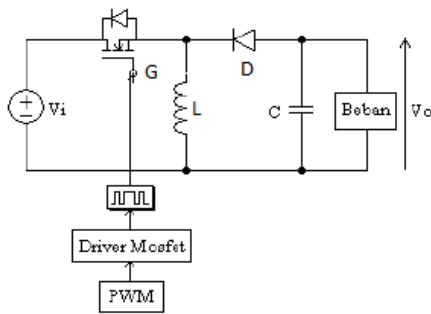
K_d = konstanta diferensial

$e(t)$ = sinyal kesalahan

Jadi, fungsi alih pengendali PID (dalam domain s) dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

BUCK-BOOST CONVERTER

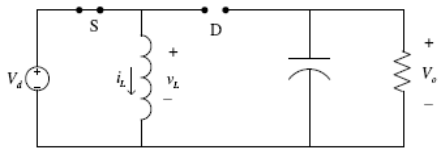


Gambar 2. Rangkaian buck-boost converter

Rangkaian Buck-Boost Converter ini merupakan rangkaian daya yang digunakan untuk memberikan tegangan eksitasi yang akan diinjeksikan ke kumpulan medan generator. Prinsip kerja dari buck-boost ini terbagi menjadi 2 mode yaitu:

- Mode 1

Saat saklar (S) di-ON kan pada $t = 0$ dioda akan reverse bias (open) dan arus yang masuk meningkat melalui induktor (L) dan saklar (S). Karena tegangan pada kapasitor masih 0 (nol) sehingga beban tidak mendapat supply tegangan saat saklar (S) pertama kali di-ON kan. Rangkaian ekuivalen untuk mode 1 ditunjukkan apad gambar berikut ini

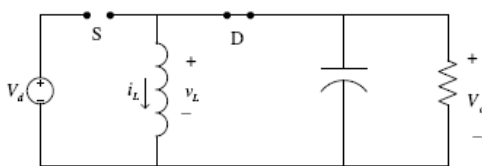


Gambar 3. Rangkaian ekuivalen mode 1

$$\Delta i_{L,closed} = \frac{V_d D T}{L}$$

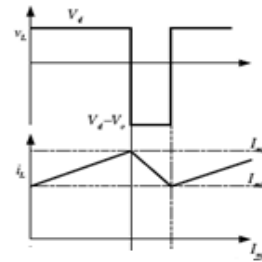
- Mode 2

Dimulai saat saklar (S) di-OFF kan, maka dioda menjadi forward bias (close) untuk menghantarkan arus. Arus mengalir dari induktor menuju kapasitor, beban. Energi yang tersimpan didalam induktor akan disalurkan ke beban. Dan arus yang ada di induktor akan berkurang sampai saklar (S) di-ON kan lagi untuk siklus berikutnya. Rangkaian ekuivalen mode 2 ditunjukkan pada gambar berikut ini



Gambar 4. Rangkaian ekuivalen mode 2

$$\Delta i_{L,opened} = \frac{V_o(1-D)T}{L}$$



Gambar 5. Gelombang arus pada induktor

Adapun tegangan keluaran rata-ratanya:

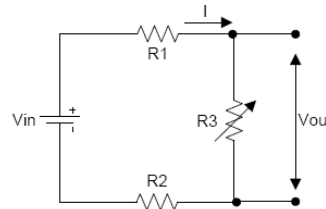
$$\Delta i_{L,closed} + \Delta i_{L,opened} = 0$$

$$\frac{V_d D T}{L} + \frac{V_o(1-D)T}{L} = 0$$

$$v_o = -v_d \left(\frac{D}{1-D} \right)$$

SENSOR TEGANGAN

Sensor tegangan ini menggunakan prinsip pembagi tegangan sensor tegangan digunakan untuk mendeteksi besarnya tegangan pada suatu sistem. Voltage divider disusun dari tiga buah resistor yang disusun secara seri kemudian dibuffer dan disearahkan untuk menjadi sinyal DC.



Gambar 6. Rangkaian Pembagi Tegangan

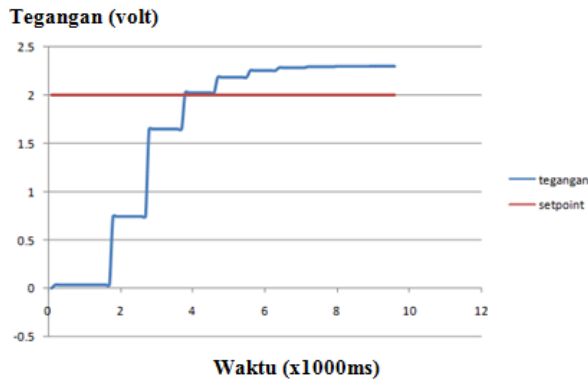
Dari gambar diatas didapat bahwa arus yang mengalir di R1, R2, dan R3 adalah sama (I). tegangan pada R1, R2, dan R3 berbeda tergantung besar resistansi masing-masing tahanan. Tegangan output merupakan tegangan yang akan terbaca besarnya adalah:

$$I = \frac{V_{in}}{R1 + R2 + R3}$$

$$V_{out} = I * R3$$

IDENTIFIKASI SISTEM

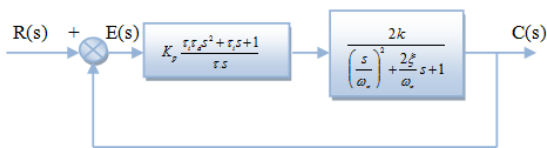
Identifikasi sistem ini dilakukan untuk mengetahui respon sistem sebelum dipasang kontroler (*open loop system*) saat tanpa beban. Proses ini dilakukan dengan memberikan tegangan masukan berupa step melalui sumber DC eksternal pada kumpulan medan generator. Berikut adalah gambar respon sistem *open loop* saat tanpa beban.



Gambar 7. Rrespon open loop sistem tanpa beban

PERENCANAAN KONTROLER PID

Untuk mendapatkan respon sistem yang sesuai dengan setpoint yang diberikan, maka dibutuhkan sebuah kontroler. Ada berbagai jenis kontroler dan berbagai macam metode pendekatan untuk mendapatkan nilai dari parameter kontroler. Pemilihan metode kontrol dipengaruhi oleh jenis plant yang akan diatur. Dalam proyek akhir ini kontroler yang digunakan adalah tipe PID (Proportional-Integral-Derivatif). Berikut ini adalah Blok diagram dari kontrol jenis PID



Gambar 8. Diagram Blok Kontrol PID

Spesifikasi desain:

- $T_s(\pm 5\%) = 1$ detik
- Tanpa overshoot

Model matematis *plant* yang digunakan adalah saat *plant* tanpa beban yaitu

$$TF = H(s) = \frac{1,141}{0,0826s^2 + 0,4591s + 1}$$

Parameter yang perlu dicari dari kontroler PID ini antara lain K_p , τ_i , τ_d . Dengan menggunakan metode analitik akan dihitung besar nilai K_p , τ_i , τ_d sebagai berikut:

Dengan $\tau_i \tau_d = \frac{1}{\omega_n^2}$ maka,

- Waktu integral:

$$\frac{2\zeta}{\omega_n} = \tau_i$$

$$\frac{2(0,7988)}{3,48} = \tau_i$$

$$\tau_i = 0,46$$

- Konstanta waktu sistem hasil:

$$t_s^* = 5\tau^*$$

$$1 = 5\tau^*$$

$$\tau^* = 0,2 \text{ det ik}$$

- Waktu differensial:

$$\tau_i \tau_d = \frac{1}{\omega_n^2}$$

$$0,46\tau_d = \frac{1}{3,48^2}$$

$$\tau_d = 0,18$$

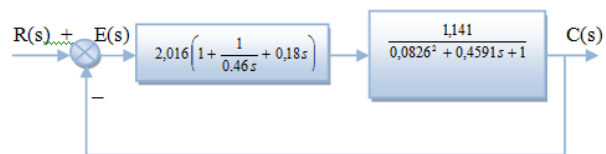
- Penguatan proporsional:

$$Kp = \frac{\tau_i}{\tau^* k}$$

$$Kp = \frac{0,46}{0,2(1,141)}$$

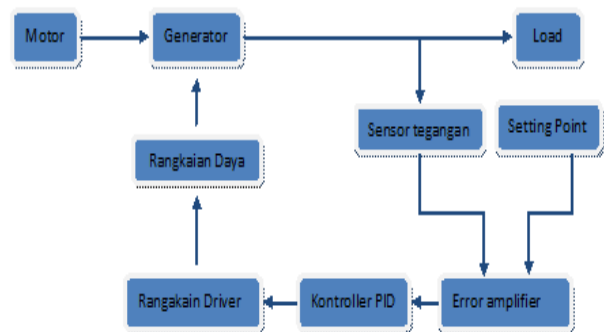
$$Kp = 2,016$$

Dengan memasukkan nilai-nilai diatas kedalam blok diagram kontrol PID maka diperoleh blok diagram sistem hasil rancangan sebagai berikut:



Gambar 9. Diagram Blok Sistem Hasil Rancangan

METODE PENGONTROLLAN



Gambar 10. Blok diagram sistem

Gambar 10 diatas menunjukkan konfigurasi dasar dari kontrol AVR dengan kontroler PID yang rangkain pembagi tegangan (*voltage divider*) sebagai sensor tegangan dengan rangkain daya dc-dc converter jenis buck-boost sebagai aktuatur untuk menginjeksikan tegangan eksitasi kekomparan medan generator.

PENGENALAN PLANT

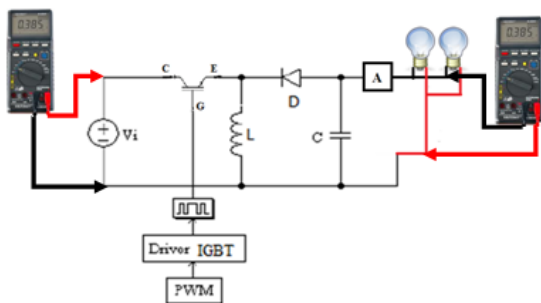
Plant yang digunakan adalah generator AC 3 fasa dengan penggerak mula yaitu motor sinkron 3 fasa dengan spesifikasi sebagai berikut:

- Motor sinkron 3 fasa
 - Daya : 2.2 kW
 - Tegangan : 380 V
 - Frekuensi : 50 Hz
 - Arus : 4.6 A
 - Putaran : 1500 rpm
 - Jumlah Kutub : 4 pole
- Generator AC 3 fasa
 - Daya : 2 kVA
 - Tegangan : 380 volt
 - Arus : 3.1 A
 - Frekuensi : 50 Hz
 - Putaran : 1500 rpm
 - Jumlah kutub : 4 pole

PENGUJIAN BUCK-BOOST CONVERTER

Pengujian rangkaian ini untuk mengetahui tegangan dan arus keluaran yang mampu dihasilkan dari *buck-boost converter* karena nantinya tegangan dan arus keluaran dari *buck-boost converter* ini akan menjadi sumber eksitasi penguat medan generator sinkron. Sehingga tegangan dan arus keluaran dari *buck-boost converter* ini menjadi parameter efisiensi dan kemampuan *actuator* daya dalam menyuplai tegangan eksitasi.

Pada pengujian *buck-boost converter* ini disisi keluaran rangkaian diberi beban 2 buah lampu pijar (400 W) dengan tegangan dc masukan dari hasil penyearahan tegangan 64 volt AC menjadi 87 volt dc serta frekuensi untuk switching sebesar 40kHz. Dengan merubah besarnya *dutycycle* akan menghasilkan tegangan dan arus keluaran *buck-boost converter* yang berbeda-beda seiring dengan perubahan *dutycycle* tersebut. Hasil pengujian rangkaian *buck-boost converter* dapat dilihat pada tabel 4.2 hasil pengujian.



Gambar 11. Blok Pengujian Rangkaian Buck-Boost Converter

Tabel 1. Hasil Pengujian Efisiensi *Buck-Boost Converter*

| Vin (volt) | Iin (ampere) | Vout (volt) | Iout (ampere) | Efisiensi |
|------------|--------------|-------------|---------------|-----------|
| 86.4 | 0.3 | 28.4 | 0.8 | 87.6% |
| 86 | 0.4 | 39 | 0.83 | 94.1% |
| 85.3 | 0.6 | 48 | 0.94 | 88.2% |
| 84.8 | 0.72 | 54 | 1 | 88.4% |
| 83.5 | 1 | 62.7 | 1.12 | 84.1% |
| 83.1 | 1.2 | 73.9 | 1.2 | 88.9% |
| 83 | 1.6 | 85.7 | 1.26 | 81.3% |
| 82.9 | 2 | 94 | 1.4 | 79.4% |
| 82.4 | 3 | 116 | 1.52 | 71.3% |
| 82 | 3.6 | 130 | 1.6 | 70.5% |

$$efisiensi = \left(\frac{P_{out}}{P_{in}} \right) \times 100\%$$

Keterangan:

- Pout = Daya output (Vout x Iout)
- Pin = Daya input (Vin x Iin)

Dari tabel hasil pengujian diatas, diperoleh tegangan dan arus keluaran rangkaian *buck-boost converter* dapat bertahan pada tegangan 130 volt dan arus 1.6 ampere. Pada kondisi tersebut induktor mulai mengalami saturasi dan mulai bergetar sehingga timbul bunyi pada induktor. Selain itu tegangan dan arus keluaran dari *buck-boost converter* mulai tidak stabil. Dengan demikian rangkaian *buck-boost converter* hanya mampu memberikan suplay tegangan eksitasi untuk penguat medan generator sampai batas tersebut.

Sedangkan untuk efisiensinya rata-rata diatas 70% dan mengalami penurunan seiring dengan kenaikan *dutycycle* serta tegangan keluarannya. Hal ini terjadi kemungkinan disebabkan karena induktor yang mulai saturasi dan berbunyi. Induktor yang saturasi dan berbunyi itu dimungkinkan karena desain induktor yang kurang bagus misalnya *air gap* yang kurang besar dan rapat serta lilitan kawat induktor benar-benar kurang rapat sehingga masih ada ruang. Dengan frekuensi *switching* sebesar 40kHz maka induktor akan bergetar dan saturasi sehingga menyebabkan banyak rugi-rugi yang membuat efisiensi rendah. Pada tabel tabel 2. merupakan perbandingan antara hasil pengukuran dengan hasil perhitungan teoritis.

Tabel 2. Hasil Pengujian Error Rangkaian *Buck-Boost Converter*

| Duty cycle | Vin (Volt) | Vout_R (volt) | Vout_T (volt) | V_error |
|------------|------------|---------------|---------------|---------|
| 23% | 86.4 | 28.4 | 25.8 | 10% |
| 28% | 86 | 39 | 33.4 | 16% |
| 35% | 85.3 | 48 | 45.93 | 4% |
| 40% | 84.8 | 54 | 56.5 | 4% |
| 46.5% | 83.5 | 62.7 | 69.9 | 10% |
| 52% | 83.1 | 73.9 | 90 | 17% |
| 58% | 83 | 85.7 | 114.6 | 25% |
| 64% | 82.9 | 94 | 147.4 | 36% |
| 69.7% | 82.4 | 116 | 189.5 | 38% |
| 75.5% | 82 | 130 | 252.7 | 48% |

$$V_error = \left| \frac{Vout_T - Vout_R}{Vout_T} \right| \times 100\%$$

Keterangan :

V_error : Tegangan error

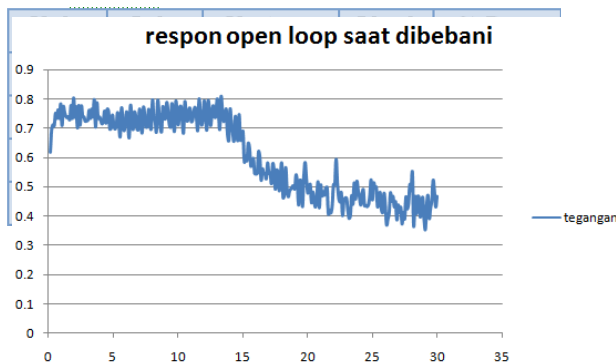
Vout_T : Tegangan output perhitungan

Vout_R : Tegangan output pengukuran

PENGUJIAN SISTEM OPEN LOOP

Pada pengujian sistem secara *open loop* ini, *actuator buck-boost converter* dijalankan untuk memberi tegangan eksitasi sampai tegangan 380 volt. Kemudian output generator diberikan beban resistif load. Berikut ini adalah tabel hasil pengujian sistem *open loop* menggunakan *actuator buck-boost converter*.

Tabel 3. Hasil Pengujian Sistem Open Loop



Gambar 12. Respon Tegangan Output Generator Saat Open Loop

Dari tabel hasil pengujian dan grafik tegangan output generator saat sistem open loop, tegangan generator tidak berubah saat belum

dibebani. Ketika mulai dibebani dengan arus beban 0.4 A tegangan generator turun 1,05%. Dan saat arus beban mencapai 1,23 A tegangan generator turun 5.26% dari tegangan nominal. Penurunan tegangan generator diikuti dengan penurunan tegangan eksitasi dan arus eksitasinya.

Untuk tegangan eksitasi dari keluaran *buck-boost converter* saat dilakukan pengujian parsial mengalami perubahan dengan saat dimasukkan ke penguat medan generator. Saat uji parsial untuk menghasilkan arus 1,3 A tegangan *buck-boost converter* sebesar 86 volt. Sedangkan saat dimasukkan ke penguat medan untuk menghasilkan arus 1,3 A (supaya tegangan output generator nominal 380 volt) tegangan *buck-boost converter* turun menjadi 55 volt. Hal ini dikarenakan saat pengujian parsial *buck-boost converter* dibebani lampu pijar dimana lampu pijar beban bersifat resistif. Sedangkan saat dibebani penguat medan yang tidak bersifat resistif saja tetapi juga ada unsur induktifnya karena penguat medan adalah sebuah kumparan. Sehingga saat dimasukkan ke penguat medan generator tegangan *buck-boost converter* turun 36% dari saat pengujian parsial.

PENGUJIAN SISTEM CLOSE LOOP

Setelah dilakukan proses desain dan pembuatan, selanjutnya dilakukan implementasi langsung ke *plant* generator sinkron 3 fasa melalui konfigurasi antara ADAM 5000 *series* dengan *hardware* yang telah dibuat. Pada pengujian integrasi sistem secara tertutup ini, semua bagian dari blok-blok diagram yang telah diuji digabungkan menjadi satu yang meliputi kontroler, *buck-boost converter*, dan sensor tegangan.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Parameter PID Metode Analitik

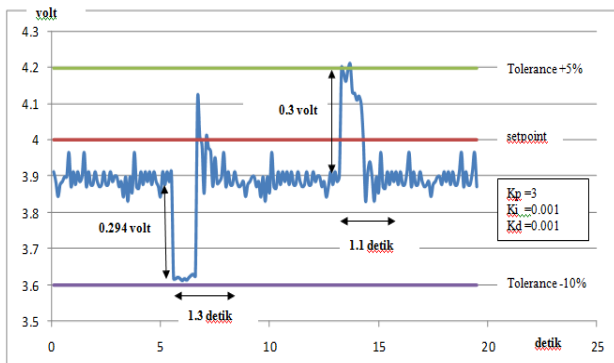
| Metode/Parameter PID | Respon yang diinginkan | Kp | Ki | Kd |
|----------------------|------------------------|----|----|-----|
| Tanpa beban | 1 second | 2 | 3 | 0.3 |

Parameter kontroler PID hasil perhitungan diatas tidak tepat apabila diterapkan pada kontroler. Oleh karena itu perlu dilakukan proses *tuning* untuk mencari parameter kontroler sampai respon sistem sesuai dengan yang diharapkan. Setelah melakukan proses *tuning* parameter kontroler dan melihat respon sistem maka diperoleh parameter kontroler PID yang cukup baik. Berikut ini adalah tabel parameter kontroler hasil proses *tuning*.

Tabel 4. Hasil Tuning Parameter Kontrol PID

| Metode/Parameter PID | Respon sistem | Kp | Ki | Kd |
|----------------------|---------------|----|-------|-------|
| Beban resistif | 1,3s dan 1,4s | 3 | 0.001 | 0.001 |

Pengujian *plant* dengan beban resistif murni pada masing-masing fasa. *Setting point* yang diberikan adalah 4,17 volt dc dan time sampling 0.001s.



Gambar 13. Analisa Respon Transient Plant Berbeban Resistif

Dari gambar 13 dapat dilihat bahwa gangguan terhadap plant terjadi pada detik 6 saat beban mulai dimasukkan. Pada saat generator mulai dibebani tegangan keluarannya turun seketika hingga sebesar -9.5% dari tegangan nominal generator. Ini terjadi karena arus yang mengalir ke beban semakin besar sehingga terjadi drop tegangan yang sangat besar di impedansi dalam generator. Lama waktu kontroler untuk mengembalikan tegangan ke setting point adalah 1,3 detik. Sedangkan pada detik 13 saat beban dilepas tegangan keluaran generator naik hingga sebesar 5.2% dari tegangan nominal generator. Hal ini dikarenakan arus beban tiba-tiba mengecil sehingga drop tegangan di impedansi dalam generator mengecil dan tegangan keluaran generator membesar. Dan lama waktu kontroler untuk mengembalikan tegangan ke setting point adalah 1,1 detik. Dengan naik turunnya tegangan generator, maka kontroler akan memberikan aksi kontrolnya yaitu dengan menaikkan turunkan tegangan kontrol sampai tercapai keadaan *error* yang paling kecil.

KESIMPULAN

Berdasarkan data-data yang diperoleh dari semua pengujian yang telah dilakukan dapat disimpulkan :

1. Kontroler PID dapat diimplementasikan pada pengaturan tegangan eksitasi generator untuk menstabilkan tegangan keluaran generator pada saat perubahan beban.
2. Tegangan keluaran generator mengalami gangguan saat beban generator dimasukkan dan dilepas secara tiba-tiba. Pada saat beban dimasukkan tegangan keluaran generator turun karena adanya

drop tegangan pada impedansi dalam generator.

3. Parameter kontroler yang sesuai untuk mendapatkan respon sistem yang diharapkan adalah dengan nilai $K_p=3$, $K_i=0.001$ dan $K_d=0.001$
4. Kondisi *transient* dari *plant* memerlukan lama waktu 1,3 detik untuk mencapai steady state saat generator dibebani dan 1,1 detik untuk mencapai steady state saat beban pada generator dilepas.
5. *Overshoot* dan *undershoot* dari respon generator masih memenuhi standar toleransi tegangan yaitu -10% dan +5%. Saat dibebani tegangan turun 9.5% dan saat beban dilepas tegangan naik 5.2% dari tegangan nominal generator.
6. Rangkaian daya *dc-dc converter* jenis *buck-boost converter* sudah mampu menyuplai tegangan eksitasi saat generator diberi beban sehingga tegangan generator tetap stabil.

DAFTAR PUSTAKA

1. Rashid, Muhammad H. "Power Electronics, Circuit, Devices, and Application.". 2004. Prentice Hall
2. Astrom, Karl Johan. "Control System Design".2002
3. Sulasno. "Teknik Konversi Energi Listrik dan Sistem Pengaturan".2009
4. Daniel Lau Lee Kah "Control System for AVR and Governor of Synchronous Machine". Queensland of University
5. Intruction manual book motor and generator demonstrator MG-2009-1P