

Rancang Bangun Kontroler Tegangan Analog untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dengan Generator Sinkron 3 Fasa Kapasitas 9MVA

Estiko Rijanto

*Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronika LIPI
estiko.rijanto@lipi.go.id; estiko@hotmail.com.*

Abstrak

Beberapa Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di Indonesia yang telah dioperasikan lebih dari dua dekade masih memakai teknologi analog untuk kontroler tegangannya yang diimpor dari luar negeri. Berhentinya produksi kontroler tegangan analog tersebut di luar negeri mengancam kesinambungan operasi PLTA yang bersangkutan. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang bangun sebuah unit kontroler tegangan otomatis menggunakan rangkaian elektronik analog untuk sistem eksitasi statik pada pembangkit listrik generator sinkron 3 fasa berkapasitas 9MVA. Kontroler ini tersusun oleh beberapa modul utama yaitu: (a) pengeset tegangan referensi, (b) pendeteksi tegangan generator, (c) regulator tegangan, (d) penguat penyesuai, dan (e) regulator sudut pulsa penyalakan jembatan thyristor gelombang penuh. Unit kontroler tegangan analog hasil rancang bangun pada penelitian ini telah diujicoba pada eksperimen simulasi dan dapat bekerja dengan baik memenuhi spesifikasi.

Kata kunci: PLTA, kontroler tegangan analog, sistem eksitasi statik, jembatan thyristor.

1. Pendahuluan

Permasalahan listrik di Indonesia saat ini masuk kategori “stadium darurat lanjut”. Kapasitas pembangkit listrik terpasang saat ini (21.000 MW) lebih besar dari beban listrik puncak (16.800 MW), namun pemadaman listrik bergilir terus saja terjadi. Salah satu penyebab teknis masalah ini adalah banyak peralatan listrik baik untuk pembangkit, transmisi, dan distribusi yang telah berumur tua [1]. Sementara itu, untuk mengantisipasi pertumbuhan kebutuhan listrik yang diprediksi 9% per tahun, pemerintah telah memulai pembangunan banyak pembangkit listrik baru berbahan bakar batu bara dalam program 10.000MW [2]. Namun revitalisasi peralatan listrik tua, termasuk sistem eksitasi pada pembangkitnya, perlu dilakukan juga.

Energi listrik perlu dipasok dengan daya listrik sesuai dengan kebutuhan dan dengan mutu listrik yang memadai agar tidak merusak peralatan listrik. Mutu listrik ditentukan oleh dua variabel penting yaitu frekuensi listrik yang stabil dan tegangan listrik yang stabil pada nilai nominalnya. Di Indonesia, spesifikasi frekuensi dalam keadaan normal adalah tidak kurang dari 49,5 Hz dan tidak lebih dari 50,5Hz, sedangkan spesifikasi tegangan listrik misalnya untuk jaringan nominal 20kV adalah +5% dan -10%, seperti ditentukan di dalam Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral tahun 2007 [3]. Untuk memenuhi standar yang ada, pada setiap pembangkit listrik diperlukan kontrol frekuensi dan kontrol tegangan.

Beberapa PLTA di Indonesia yang dibangun lebih dari dua dasa warsa lalu masih beroperasi. Pembangkit listrik ini menggunakan teknologi analog untuk sistem kontrol tegangannya yang diimpor

dari luar negeri. Berhentinya produksi kontroler tegangan tersebut di luar negeri mengancam kesinambungan operasi PLTA yang bersangkutan.

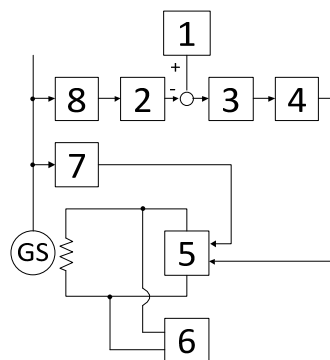
Makalah ini melaporkan rancang bangun kontroler tegangan generator untuk PLTA yang menggunakan generator sinkron 3 fasa. Kontroler tegangan ini dirancang bangun menggunakan rangkaian elektronik analog. Rancang bangun ini dilakukan berbasis unit kontroler analog produk impor yang dioperasikan pada sebuah PLTMH kapasitas 8889kVA yang digunakan sebagai acuan. Beberapa sinyal hasil pengukuran kontroler acuan dianalisis dan fungsi beberapa modul rangkaian elektronik pada kontroler acuan diteliti. Kontroler tegangan analog baru dirancang bangun agar memiliki fungsi yang sama dengan kontroler acuan dan hal ini dibuktikan dengan membandingkan sinyal hasil pengukuran ke dua kontroler tersebut.

Dengan terbangunnya kemampuan rancang bangun kontroler tegangan untuk PLTA ini diharapkan dapat turut memecahkan permasalahan kelistrikan yang ada di Indonesia. Kemampuan rancang bangun dalam negeri perlu ditingkatkan untuk meningkatkan kemandirian teknologi kelistrikan nasional.

2. Sistem kontrol eksitasi statik

Tegangan listrik keluaran pembangkit diatur oleh sistem eksitasi yang memakai regulator tegangan sebagai salah satu komponen utamanya. Sistem eksitasi dapat dibedakan menjadi 2 tipe yaitu: (1) sistem eksitasi rotasi, dan (2) sistem eksitasi statik. Pada sistem eksitasi rotasi tegangan lilitan medan generator dibangkitkan oleh generator eksitasi dengan kapasitas lebih kecil. Menurut jenis generator eksitasi yang digunakan maka sistem eksitasi rotasi terbagi menjadi sistem eksitasi rotasi arus searah (*Direct Current /DC*) dan sistem eksitasi arus bolak balik (*Alternating Current /AC*). Sistem eksitasi rotasi memerlukan sikat karbon penghubung listrik antara komponen listrik pada poros yang berputar dengan komponen listrik pada

stator sehingga menuntut pemeliharaan rutin. Sistem eksitasi statik secara mekanik lebih sederhana karena tidak membutuhkan komponen yang berotasi sehingga tidak memerlukan pemeliharaan seperti yang dituntut pada sistem eksitasi rotasi. Namun sistem eksitasi statik secara elektronik lebih kompleks dan membutuhkan kontrol yang presisi. Gambar 1 menunjukkan diagram kotak ilustrasi sistem eksitasi statik untuk generator sinkron 3 fasa [4].



Gambar 1 Sistem kontrol eksitasi statik pada sistem kontrol tegangan generator sinkron 3 fasa

Secara garis besar sistem eksitasi ini tersusun oleh komponen utama yaitu: (1) pengeset tegangan referensi, (2) pendeteksi tegangan 3 fasa, (3) kontroler (regulator) tegangan terminal generator, (4) kontroler (regulator) sudut penyalan thyristor, (5) jembatan thyristor, (6) sistem eksitasi awal menggunakan catu daya arus searah, (7) transformer eksitasi, (8) transformer instrumentasi berupa *potential transformer* (PT) untuk mengukur tegangan 3 fasa dan *current transformer* (CT) untuk mengukur arus 3 fasa. Pada sistem eksitasi statik arus listrik searah yang mengalir di lilitan medan dicatu oleh jembatan thyristor yang mendapat catu daya 3 fasa dari transformer eksitasi, dan tegangan lilitan medan dikontrol dengan cara mengontrol sudut penyalan masing-masing thyristor menggunakan kontroler sudut penyalan thyristor. Algoritma kontrol dieksekusi oleh kontroler tegangan.

Pada saat sistem eksitasi mulai bekerja, arus listrik ke lilitan medan dicatu oleh sistem eksitasi awal berupa sumber tegangan dc (misal 110VDC). Saat pendeteksi tegangan membaca tegangan terminal generator telah mencapai nilai tertentu (misal 30% dari nilai tegangan nominal) maka arus dari catu daya sistem eksitasi awal diputus dan fungsi sistem eksitasi diambil alih regulator tegangan otomatis.

3. Metodologi

3.1. Objek penelitian

Objek penelitian adalah suatu generator sinkron (GS) 8889 kVA, 6,3kV/50Hz. Perputaran 500 rpm, jumlah kutub 12 dan faktor daya 0,9. Generator ini digunakan pada sebuah PLTMH yang mulai beroperasi pada tahun 1987.

Sebuah trafo daya berkapasitas 120 kVA dipakai untuk menurunkan tegangan keluaran GS dari 6,3 kV ke 100 V. Tegangan AC ini dilewatkan melalui lilitan reaktor pada masing-masing fasanya sebelum dimasukkan ke jembatan thyristor sebagai sumber daya AC. Tiga buah trafo digunakan untuk menurunkan tegangan keluaran GS dari $6,3/\sqrt{3}$ kV ke $100/\sqrt{3}$ V. Tegangan ini dimasukkan ke kontroler tegangan untuk dua tujuan yaitu: (1) sebagai sinyal umpan balik tegangan keluaran GS, dan (2) sebagai sinyal sinkronisasi untuk mengatur pulsa penyalan thyristor.

Kontroler tegangan otomatis yang digunakan pada pembangkit tersebut adalah buatan luar negeri yang saat ini sudah tidak lagi diproduksi (Gambar 2). Hal ini mengancam kelangsungan operasi pembangkit jika suatu saat terjadi kerusakan pada kontroler tegangan otomatis tersebut.

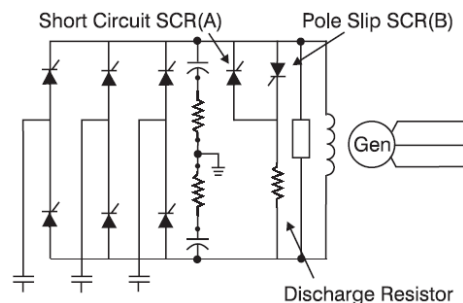
Dari observasi visual secara teliti terhadap sistem yang telah ada pada Gambar 2 diperoleh informasi sebagai berikut: (1) sistem yang telah ada ini memiliki rangkaian elektronik dan elektronika daya yang kompleks, (2) banyak komponen yang tidak bisa dibaca informasinya dan banyak komponen yang tidak dapat ditemukan *data sheet* nya.



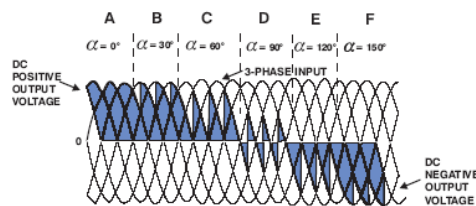
Gambar 2 Kontroler acuan yang telah ada

3.2 Rancang bangun kontroler

Pada penelitian ini digunakan jembatan thyristor gelombang penuh. Gambar 3 (a) menunjukkan rangkaian jembatan thyristor menggunakan 6 buah thyristor sebagai penyearah [5]. Jembatan thyristor gelombang penuh ini memiliki 2 kuadran karena tegangan lilitan medan dapat bergerak ke arah positif dan ke arah negatif yang memungkinkan gerakan tegangan terminal generator cepat.



(a). Jembatan thyristor



(b). Keluaran jembatan thyristor

Gambar 3 Jembatan thyristor gelombang penuh.

Gambar 3 (b) menunjukkan bentuk gelombang keluaran jembatan thyristor gelombang penuh. Pada saat tegangan terminal generator lebih rendah dari pada nilai nominalnya, misalnya saat terjadi gangguan sistem sesaat, jembatan thyristor akan bekerja mengeluarkan tegangan lilitan medan pada arah positif yaitu pada zona A, B dan C. Zona A adalah zona saat tegangan lilitan medan arah positif bernilai maksimum. Saat tegangan terminal generator sama dengan tegangan nominalnya (keadaan normal) maka jembatan thyristor bekerja pada zona D dengan sudut penyalan 90 derajat listrik. Ketika tegangan terminal generator melebihi nilai nominalnya tegangan lilitan medan (keluaran jembatan thyristor) bergerak ke arah negatif yaitu pada zona E maupun F untuk menurunkan tegangan medan dengan cepat. Untuk jembatan thyristor gelombang penuh, tegangan lilitan medan diberikan oleh formula di bawah ini [6].

$$E_f = 1,35E_s \cos \alpha \tag{1}$$

dimana:

E_f : Tegangan lilitan medan (Volt)

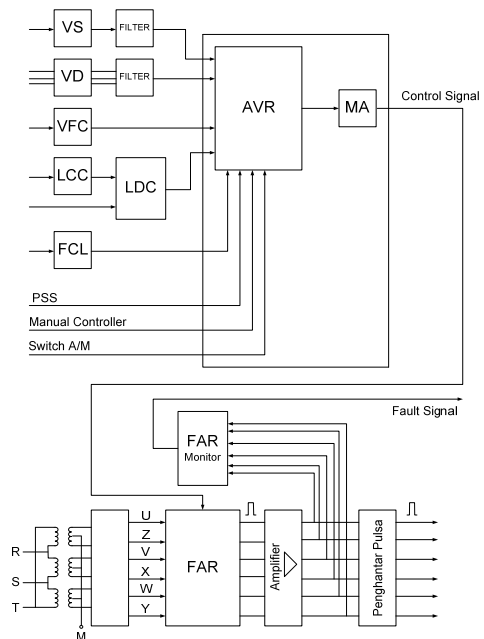
E_s : Tegangan RMS *line to line* lilitan sekunder transformer eksitasi (Volt).

α : sudut penyalan (Radian).

Gambar 4 menunjukkan diagram kotak sistem kontrol tegangan otomatis analog yang dirancang bangun pada penelitian ini. Modul rangkaian utama sistem kontrol tegangan analog ini adalah:

- a. Modul rangkaian pengeset tegangan referensi (modul 1/VS).
- b. Modul rangkaian pendeteksi tegangan terminal generator (modul 2/VD)
- c. Regulator tegangan (modul 3/AVR)
- d. Penguat penyesuai (modul 4/MA)
- e. Modul regulator sudut penyalan (modul 5/FAR)
- f. Modul rangkaian pemonitor regulator sudut penyalan (modul 6/FAR Mon)

Modul regulator tegangan (modul 3) juga menerima beberapa sinyal tambahan dari beberapa modul tambahan. Beberapa sinyal tambahan tertentu (sinyal keluaran kompensator tegangan-frekuensi (modul 7/VFC), sinyal keluaran kompensator *line drop* (modul 10/LDC), dan keluaran modul PSS (*Power System Stabilizer*)) masuk lewat bagian penjumlahan sedangkan beberapa sinyal tambahan lain (sinyal keluaran rangkaian *line charging* (modul 8)/LCC, dan sinyal keluaran rangkaian pembatas arus medan (modul 9/FCL)) masuk lewat bagian pembatas atas dan bawah sinyal keluaran regulator tegangan.



Gambar 4 Diagram kotak kontroler tegangan analog

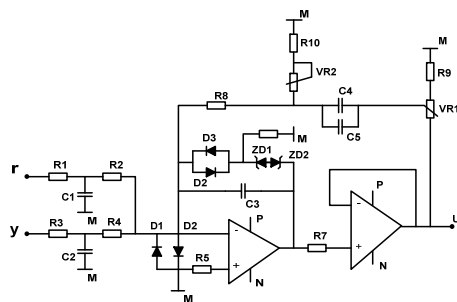
Modul rangkaian pengeset tegangan referensi (modul 1) berfungsi untuk menerima inputan nilai tegangan referensi yang diinginkan dari operator dan memasukkannya ke modul rangkaian regulator tegangan. Rangkaian ini tersusun oleh dua sub-modul yaitu: (a) modul antar muka, dan (2) modul penjumlah. Operator, yang biasanya berada di ruang kontrol jauh dari tempat boks kontroler generator berada, menekan tombol naik untuk menaikkan nilai

atau menekan tombol turun untuk menurunkan nilai referensi, sinyal digital ini diterima oleh modul rangkaian antar muka lalu dirubah menjadi sinyal analog (konversi digital ke analog). Modul antar muka menerima sinyal digital dari operator agar nilai referensi tidak terpengaruh oleh derau. Modul penjumlah menerima sinyal analog referensi operator dari modul antara muka lalu menjumlahkannya dengan dua sinyal referensi lain yaitu: (1) sinyal referensi dasar, dan (2) sinyal referensi pengesetan *start*. Sinyal referensi dasar umumnya diset *default* 30% dari total nilai referensi nominal, sedangkan sinyal referensi pengesetan *start* bermula dari nol kemudian saat modul kontroler tegangan analog ini mendapat perintah aktif maka naik sedikit demi sedikit sampai pada nilai 50% dari total nilai referensi dalam jangka waktu tertentu. Agar tidak menimbulkan *over shoot*, maka lama waktu pengesetan *start* ini diatur agar lebih besar dari waktu transien generator (T_{pdo}) (misalnya 1 detik). Nilai tegangan referensi total berkisar 0V (setara dengan 0%) sampai dengan 10V (setara dengan 110%). Operator pada dasarnya hanya diberi otoritas secara manual merubah nilai referensi tegangan antar 0V sampai dengan 2,73V (setara 30%). Nilai referensi dari operator sebesar 0V jika total tegangan referensi yang diinginkan adalah 80%, dan tegangan referensi dari operator sebesar 2,73 jika total tegangan referensi yang diinginkan adalah 110% dari nilai nominal. Referensi nominal 100% setara dengan 9,091V.

Modul rangkaian pendeteksi tegangan terminal generator menerima sinyal AC dari transformator instrumen pengukur tegangan (*Potential Transformer* /PT) yang mengeluarkan tegangan AC 22V (rms)/100% kemudian merubahnya menjadi sinyal arus searah (misal -8,7V) memakai jembatan dioda (*rectifier*). Parameter rangkaian ini diatur agar rangkaian ini mengeluarkan sinyal -10V saat tegangan terminal generator senilai 110% dari tegangan generator nominal (atau keluaran transformator instrumen $110\% \times 22 = 24.2VAC$). Sebelum regulator tegangan

otomatik mengambil alih kendali, kontrol tegangan terminal generator dilakukan oleh pre-eksitasi yang mengoperasikan generator sampai pada tegangan 30% tegangan nominal. Pada modul ini juga ada rangkaian pembuat sinyal "ambil alih" dari pre-eksitasi ke regulator tegangan otomatis. Ketika sinyal analog keluaran pendeteksi tegangan mencapai 30% tegangan nominal (-2,73V) maka sinyal ambil alih dikeluarkan untuk mengaktifkan *relay*. *Relay* ini mengaktifkan modul rangkaian lainnya yang perlu aktif bersamaan saat regulator tegangan otomatis aktif.

Modul rangkaian regulator tegangan (modul 3) merupakan modul yang berfungsi mengeksekusi algoritma kontrol umpan balik. Modul ini memiliki 3 bagian yaitu: (1) bagian penjumlahan, (2) bagian algoritma, dan (3) bagian pembatas nilai sinyal. Bagian penjumlahan menerima sinyal referensi tegangan dan sinyal umpan balik dari rangkaian pendeteksi tegangan kemudian menghitung selisih antara dua sinyal tersebut. Sinyal selisih ini diproses memakai algoritma kontrol umpan balik untuk menghitung sinyal kontrol yang dikeluarkan modul regulator tegangan ke modul penguat penyesuai. Sinyal kontrol keluaran modul regulator tegangan dibatasi berkisar -10V sampai dengan 10V.



Gambar 5 Rangkaian dasar regulator tegangan berbasis kontrol *Proportional Integral*

Gambar 5 menunjukkan rangkaian regulator tegangan yang dirancang bangun pada makalah ini. Rangkaian ini merealisasikan algoritma kontrol umpan balik tipe *Proportional Integral* (PI) yang

dapat diekspresikan dalam formula sebagai berikut:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt \quad (2)$$

$$e(t) = r(t) - y(t) \quad (3)$$

dimana:

$u(t)$: sinyal kontrol keluaran regulator.

$r(t)$: sinyal referensi tegangan generator.

$y(t)$: sinyal ukur tegangan generator.

$e(t)$: selisih (error).

K_p : gain proporsional.

K_i : gain integral.

Pada gambar 5, sinyal referensi $r(t)$ masuk lewat *Low Pass Filter* (LPF) R1-C1 dan sinyal pengukuran tegangan $y(t)$ masuk lewat LPF R3-C2. *Operational Amplifier* (OpAmp) 1 dan OpAmp 2 merupakan komponen utama rangkaian ini yang membentuk gain pembalik kutub sinyal (*inverting gain*). VR1 digunakan untuk penyesuaian nilai gain proporsional K_p sedangkan VR2 digunakan untuk penyesuaian nilai gain integral K_i .

Gambar 6 menunjukkan modul rangkaian penguat penyesuai. Modul rangkaian penguat penyesuai (*matching amplifier*) menerima sinyal keluaran regulator tegangan, memrosesnya, dan mengeluarkan sinyal keluaran ke modul rangkaian regulator sudut penyalan (*firing angle regulator /FAR*). Sesuai dengan zona kerjanya, regulator tegangan mampu mengeluarkan sinyal -10V sampai dengan +10V dengan sinyal 0V sebagai sinyal netral. Sedangkan regulator sudut penyalan memetakan sinyal analog (0 Volt sampai dengan -10 Volt) menjadi sudut pergeseran fasa (0 derajat listrik sampai 180 derajat listrik) dengan -5V sebagai sinyal netral setara dengan sudut 90 derajat. Oleh karena itu rangkaian penguat penyesuai berfungsi menyesuaikan sinyal kontrol keluaran regulator tegangan agar sesuai dengan zona kerja kompensator sudut penyalan, yakni melakukan 3 fungsi: (1) dengan gain inverting (-1) memetakan sinyal masukan -

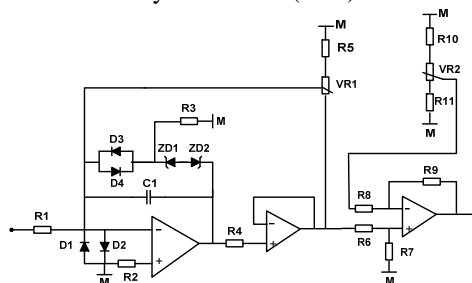
10 s.d. 10 V menjadi +10 s.d. -10 V , (2) memberikan batas minimum setara dengan 30 derajat listrik dan batas maksimum setara dengan 150 derajat listrik, (3) dengan gain non-inverting 0,5 merubah sinyal +10 s.d. -10 V menjadi +5 s.d. -5 V lalu memberikan *bias (offset)* -5 V sehingga diperoleh 0 s.d. -10 V. Fungsi pemetaan modul rangkaian penguat penyesuai dapat diekspresikan dalam formula berikut.

$$y_1(t) = -0,5y(t) - 5 \quad [\text{Volt}] \quad (4)$$

dimana:

$y(t)$: sinyal masukan (Volt)

$y_1(t)$: sinyal keluaran (Volt)



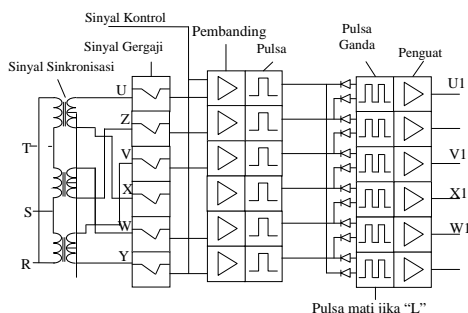
Gambar 6 Rangkaian dasar penguat penyesuai

Pada gambar 6, OpAmp 1 dan OpAmp 2 membentuk gain pembalik kutub sinyal dengan nilai gain -1 diatur menggunakan VR1. OpAmp 3 membentuk gain 0,5 dan nilai offset -5 Volt yang diatur menggunakan VR2.

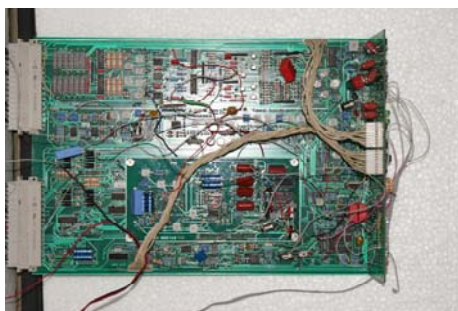
Gambar 7 menunjukkan skema rangkaian regulator sudut penyalan. Regulator sudut penyalan tersusun oleh: (1) pembangkit sinyal gergaji, (2) komparator yang membandingkan sinyal kontrol dengan sinyal gergaji untuk membangkitkan pulsa, (3) pemroses pulsa untuk membuat pulsa ganda, (4) penguat pulsa yang menguatkan daya pulsa untuk dikeluarkan ke rangkaian transformer pulsa lalu menyalakan jembatan thyristor.

Modul rangkaian regulator sudut penyalan (*firing angle regulator /FAR*) (modul 5) merubah sinyal keluaran penguat penyesuai (0 sampai dengan -10V) dengan netral -5V menjadi pulsa penyalan thyristor pada rangkaian jembatan thyristor

gelombang penuh 3 fasa. Sinyal 0V membangkitkan pulsa pada sudut 0 derajat, sinyal -5V membangkitkan pulsa pada sudut 90 derajat dan sinyal -10V membangkitkan pulsa pada 180 derajat. Sudut 0 sampai dengan kurang dari 90 derajat berarti tegangan lilitan medan (tegangan eksitasi) bernilai positif, sudut 90 derajat berarti tegangan eksitasi bernilai nol, dan sudut lebih dari 90 derajat sampai 180 derajat berarti tegangan eksitasi bernilai negatif. Pulsa penyalan keluaran modul regulator sudut penyalan aktif level rendah (0V) dan pasif level tinggi (48V) dan memiliki lebar pulsa 10 derajat sampai 15 derajat listrik dengan jarak antar dua pulsa 60 derajat.



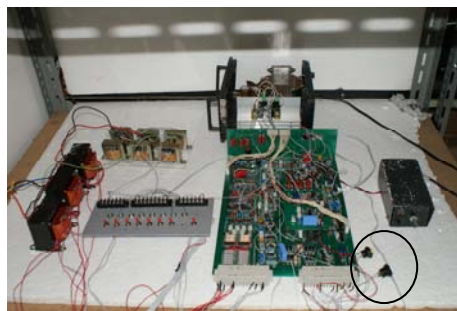
Gambar 7 Skema regulator sudut penyalan



Gambar 8 Kontroler tegangan yang dibuat

Gambar 8 menunjukkan kontroler tegangan analog yang telah dibuat. Sedangkan gambar 9 adalah foto saat dilakukan pengujian kontroler tegangan yang dibuat menggunakan simulator di laboratorium. Susunan uji coba simulator di laboratorium adalah sbb: (1) kontroler tegangan (PCB besar warna hijau), (2) panel berisi potensiometer dan switch untuk mensimulasikan sinyal masukan analog dan

sinyal masukan digital (on/off), (3) transformer pendeteksi tegangan (di samping kiri panel potensiometer), (4) transformer sinkronisasi pulsa penyalan thyristor (di sebelah atas panel potensiometer), (5) catu daya (di samping kanan dan di sebelah atas kontroler), (6) tombol naik dan tombol turun untuk menaikkan dan menurunkan tegangan referensi (di sebelah kanan bawah kontroler).



Gambar 9 Pengujian kontroler tegangan yang dibuat menggunakan simulator di laboratorium

Analog input, digital input, Testing Point (TP) dan pin konektor kontroler ini dirangkum pada tabel 1.

Tabel 1 Rangkuman sinyal dan konektor

Sinyal	Keterangan
Tombol naik	Sinyal digital masuk ke modul pengeset
Tombol turun	tegangan ferensi.
Tombol reset	Sinyal digital membuat keluaran kontroler tegangan = 0.
Zero Hold (Di1)	Sinyal digital aktifkan/pasifkan kompensator teg./frek.
Kompensator teg./frek. aktif (Di2).	Sinyal digital aktifkan/pasifkan kompensator line drop.
Kompensator line drop aktif (Di3).	Sinyal digital mengatur memakai kontroler otomatis atau manual.
Auto/Manual (Di4)	Sinyal digital mengatur fungsi modul penguat penyesuai.
Start/Stop (Di5)	Mengatur aktif/pasif regulator (tegangan dan sudut penyalan).
Aktif/Pasif (Di6) (Sinyal digital)	Inputan AC 3 fasa dari transformer ke
PT AC22V (analog 3 kanal)	

	pendeteksi teg.
PT C22V (analog 3 kanal)	Pendeteksi tegangan <i>Infinite Bus</i> .
Sinyal sinkronisasi (analog 6 kanal)	Masuk regulator sudut penyalaaan dan modul penghitung frekuensi.
Arus medan (analog 1 kanal)	Masuk ke modul <i>line</i> <i>charging</i> dan pembatas arus medan.
Sinyal regulator manual (1 kanal)	Sinyal analog keluaran regulator manual masuk ke regulator teg.
Sinyal PSS (1kanal)	Sinyal analog keluar modul PSS masuk ke regulator tegangan.
Sinyal untuk testing (analog 1 kanal)	Sinyal analog untuk pengetesan fungsi regulator tegangan.
Indikator pembatas referensi (2 kanal)	Sinyal digital keluaran dari modul pengeset referensi tegangan.
Pulsa sudut penyalaaan (6 kanal)	Sinyal digital keluar dari modul regulator sudut penyalaaan
Relay sinyal ambil alih (1 kanal)	Sinyal digital keluaran modul pendeteksi tegangan.
Sinyal indikator referensi (1 kanal)	Sinyal analog keluaran modul pengeset referensi tegangan.

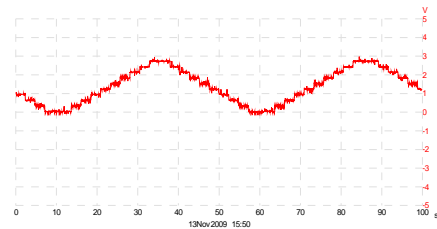
Dari tabel diketahui bahwa kontroler tegangan ini memiliki 9 kanal sinyal masukan digital, 16 kanal sinyal masukan analog, 6 kanal sinyal keluaran digital, dan 2 kanal sinyal keluaran analog.

4. Hasil uji coba dan pembahasan

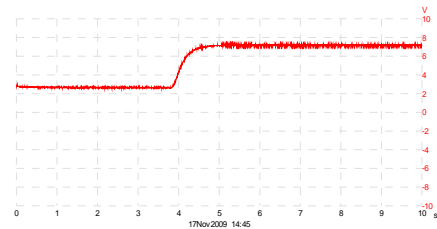
Di bawah ini ditunjukkan hasil-hasil eksperimen kontroler tegangan analog berikut pembahasannya. Eksperimen di laboratorium dilakukan untuk mengecek fungsi semua modul rangkaian yang telah dirancang bangun. Pada makalah ini dilaporkan hasil eksperimen modul-modul sebagai berikut:

- Rangkaian pengeset tegangan referensi.
- Rangkaian penguat penyesuai.
- Rangkaian regulator sudut penyalaaan.
- Rangkaian regulator tegangan.

Uji coba di laboratorium terhadap modul pengeset tegangan referensi dilakukan untuk mengecek fungsi pengesetan nilai dasar 30%, pengesetan nilai ramp 0% sampai 50% dan pengesetan oleh operator 0 sampai 30%. Gambar 10 menunjukkan hasil uji coba laboratorium modul pengeset tegangan referensi.



(a) Bagian antar muka



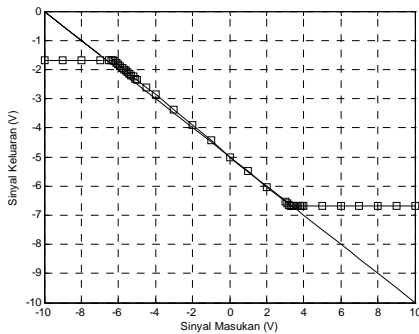
(b) Bagian penjumlahan

Gambar 10 Hasil eksperimen modul pengeset tegangan referensi

Gambar 10 (a) adalah nilai tegangan referensi yang diatur oleh operator. Dari gambar ini dapat dilihat bahwa operator dapat menurunkan nilai referensi sampai batas minimal 0 Volt dan dapat menaikkan nilai referensi sampai batas maksimal 2,7 Volt (setara 30%). Gambar 10 (b) adalah hasil penjumlahan nilai tegangan referensi dasar dan nilai ramp. Dapat dilihat bahwa saat kontroler tegangan otomatis mengambil alih kendali, keluaran bagian penjumlahan modul pengeset tegangan referensi sebesar 2,73 V (setara 30%) dan kemudian naik sampai 7,22V (setara 80%) selama 1,1 detik.

Uji coba modul rangkaian penguat penyesuai di laboratorium dilakukan untuk mengecek fungsi pemetaannya. Gambar 11 menunjukkan fungsi pemetaan sinyal masukan (sumbu horisontal) dan sinyal keluaran (sumbu vertikal) pada rangkaian penguat penyesuai. Garis solid lurus adalah

garis menurut rancangan pada persamaan (4) sedangkan garis solid dengan kotak adalah hasil eksperimen. Hasil eksperimen didapat pembatas atas -1,67 Volt dan pembatas bawah -6,68 Volt. Pembatas atas diperoleh saat sinyal masukan -6,63 Volt atau kurang sedangkan pembatas bawah diperoleh saat sinyal masukan 3,3 Volt atau lebih. Gambar ini menunjukkan bahwa fungsi pemetaan hasil uji coba sesuai dengan rancangan yang diinginkan pada persamaan (4).

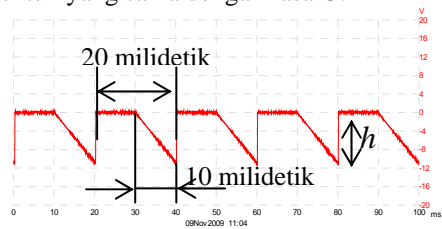


Gambar 11 Hasil uji coba fungsi pemetaan modul rangkaian penguat penyesuai

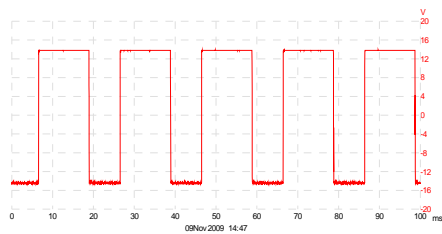
Uji coba modul regulator sudut penyalan dilakukan di laboratorium untuk mengecek fungsi pemetaan rangkaian regulator sudut penyalan saat sinyal kontrol berubah-ubah. Pertama dilakukan uji coba untuk melihat sinyal dalam modul regulator sudut penyalan. Gambar 12 (a) menunjukkan hasil pengukuran sinyal gergaji, dan gambar 12 (b) menunjukkan pulsa keluaran komparator yang membandingkan sinyal kontrol dengan sinyal gergaji untuk membangkitkan pulsa. Sinyal gergaji dibentuk berdasarkan 2 sumber sinyal yaitu sinyal sinkronisasi dan sinyal pembentuk.

Sinyal sinkronisasi menentukan sudut fasa pembentukan sinyal gergaji yaitu: 0 derajat sampai dengan 180 derajat berupa sinyal gergaji, dan antara 180 derajat sampai 360 derajat berupa sinyal netral 0 volt. Sedangkan sinyal pembentuk menentukan tinggi tegangan h . Sinyal pembentuk memiliki pembagi tegangan agar bisa diatur nilainya dan berasal dari sinyal hasil pengukuran frekuensi sinyal sinkronisasi sehingga perubahan frekuensi tidak merubah

tinggi h nominal yaitu -10Volt. Gambar 12 adalah hasil pengukuran fasa U, sedangkan hasil pengukuran 5 fasa lainnya (V,W,X,Y,Z) masing-masing memiliki bentuk yang sama dengan fasa U.



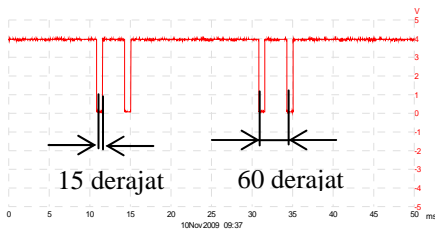
(a) Sinyal gergaji pada kanal H1



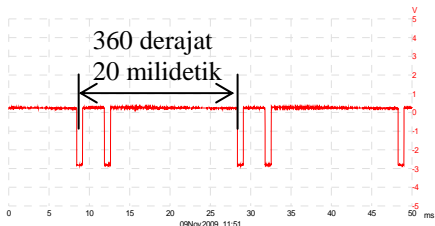
(b) Pulsa keluaran komparator kanal H7

Gambar 12 Contoh sinyal dalam modul regulator sudut penyalan

Pulsa keluaran komparator dilewatkan bagian pemroses pulsa ganda lalu dikuatkan dan kemudian dikeluarkan dari modul regulator sudut penyalan. Keluaran regulator sudut penyalan sebanyak 6 kanal (U,V,W,X,Y,Z) secara paralel dikirim ke rangkaian transformator pulsa dan ke modul rangkaian pemonitor sudut penyalan. Transformator pulsa menyalurkan pulsa penyalan ke gerbang thyristor pada masing-masing thyristor di jembatan thyristor. Modul pemonitor sudut penyalan berfungsi memonitor pulsa yang dihasilkan oleh regulator sudut penyalan dan mengeluarkan sinyal peringatan jika terjadi ketidaknormalan (misalnya ada pulsa yang terlalu lebar atau ada pulsa yang hilang). Gambar 13 menunjukkan hasil pengukuran pulsa keluaran modul rangkaian regulator sudut penyalan. Gambar 13 (a) saat sambungan ke modul pemonitor pulsa diputus dan gambar 13 (b) saat tersambung ke modul pemonitor pulsa. Pulsa ini diukur dengan memakai gain 0,25 pada probe pengukuran.



(a) Tanpa beban pemonitor pulsa



(b) Dengan beban pemonitor pulsa

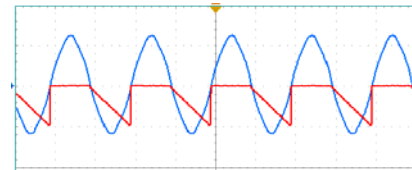
Gambar 13 Pulsa keluaran modul regulator sudut penyalan kanal U

Dari hasil ini diperoleh informasi bahwa lebar pulsa, jarak antara dua pulsa dan periode munculnya pulsa yang sama diperoleh nilai yang sama baik untuk kasus tanpa sambungan (modul regulator sudut penyalan dalam keadaan rangkaian terbuka, tanpa beban) dan untuk kasus tersambung ke modul pemonitor pulsa (dengan beban) yaitu: (1) lebar pulsa 0,83 milidetik (setara dengan 15 derajat listrik), (2) jarak antara dua pulsa berurutan 60 derajat listrik, dan (3) periode munculnya pulsa yang sama 20 milidetik (setara dengan 360 derajat listrik). Saat tanpa beban nilai atas pulsa adalah 4 Volt dan nilai bawah adalah 0 Volt (dengan tinggi 4 Volt) sedangkan saat dengan beban modul pemonitor nilai atas pulsa adalah 0,25 Volt dan nilai bawah pulsa adalah -2,75 Volt (dengan tinggi 3 Volt). Hal ini menunjukkan nilai tegangan catu daya untuk bagian penguat pulsa menentukan tinggi pulsa yang dialirkan ke transformer pulsa yang menyalakan gerbang thyristor. Hasil pengukuran ini adalah untuk fasa U, sedangkan hasil pengukuran untuk 5 fasa lain (V,W,X,Y,Z) memiliki bentuk yang sama.

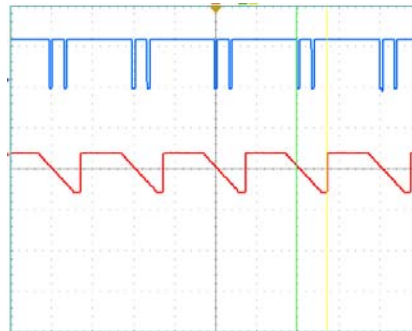
Kemudian pengukuran dilakukan untuk melihat hubungan antara sinyal sinkronisasi,

sinyal gergaji, sinyal kontrol dari modul penguat penyesuai, dan pulsa keluaran modul regulator sudut penyalan.

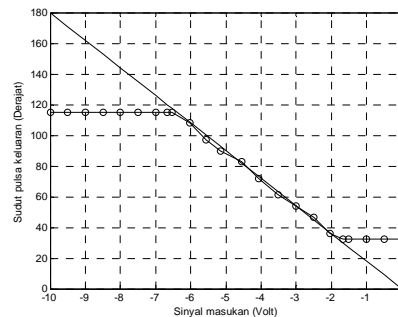
Gambar 14 menunjukkan hasil pengukuran ini.



(a) Sinyal sinkronisasi dan sinyal gergaji



(b) Pulsa keluaran dan sinyal gergaji



(c) Hubungan antara sinyal kontrol dan sudut penyalan

Gambar 14 Hubungan sinyal masukan dan keluaran pada regulator sudut penyalan

Gambar 14 (a) menunjukkan hubungan antara sinyal sinkronisasi dengan sinyal gergaji. Hasil ini mengkonfirmasi bahwa sinyal gergaji terbentuk secara sinkron dengan sinyal sinkronisasi. Gambar 14 (b) menunjukkan hubungan antara sinyal gergaji dengan pulsa penyalan thyristor saat sinyal kontrol keluaran modul penguat penyesuai

sebesar -2,5 V. Dapat dilihat bahwa pulsa pertama menyala pada sudut 45 derajat listrik. Ketika sinyal kontrol dirubah dari 0 V sampai -10 V menurut urutan [0; -0,5; -1; -1,5; -1.66; -2; -2,5; -3; -3,5; -4; -4,5; -5,2; -5,6; -6; -6,5; -6,66; -7; -7,5; -8; -8,5; -9; -9,5; -10] V telah diperoleh sudut pulsa penyalan [32,4; 32,4; 32,4; 32,4; 32,4; 36; 47; 54; 61; 72; 83; 90; 97; 108; 115,2; 115,2; 115,2; 115,2; 115,2; 115,2; 115,2; 115,2] derajat listrik. Hasil eksperimen ini ditunjukkan pada gambar 14 (c) oleh garis dengan lingkaran. Gambar 14 (c) tanpa lingkaran adalah hasil pememetaan sinyal masukan y_1 volt dan sudut pulsa keluaran α radian listrik menurut fungsi di bawah ini.

$$\alpha = -0,1\pi y_1 \quad [\text{rad}] \quad (5)$$

Setelah mengkonfirmasi fungsi modul rangkaian penguat penyesuai dan regulator sudut penyalan, kedua modul tersebut bersama-sama dengan formula jembatan transistor pada persamaan (1) dan model generator sinkron digunakan untuk mengecek fungsi regulator tegangan. Uji coba di laboratorium terhadap modul regulator tegangan dilakukan untuk mengecek fungsi algoritma Proportional Integral (PI). Pengecekan dilakukan dengan mensimulasikan secara lup tertutup sistem eksitasi memakai regulator tegangan dengan rangkaian analog yang khusus dibuat untuk mensimulasikan dinamika tegangan generator sinkron. Formula di bawah ini diturunkan sebagai fungsi alih sistem eksitasi dan dinamika tegangan terminal generator sinkron.

$$K_{SE}(s) = G_{JT} G_{RSP} G_{PP} G_{RT}(s) \quad (6)$$

$$G_{GS}(s) = \frac{|\Delta V_T|}{\Delta E_f} \quad (7)$$

Dimana:

K_{SE} : fungsi alih sistem eksitasi.

G_{JT} : fungsi alih jembatan thyristor

G_{RSP} : fungsi alih regulator sudut penyalan.

G_{PP} : fungsi alih modul penguat penyesuai.

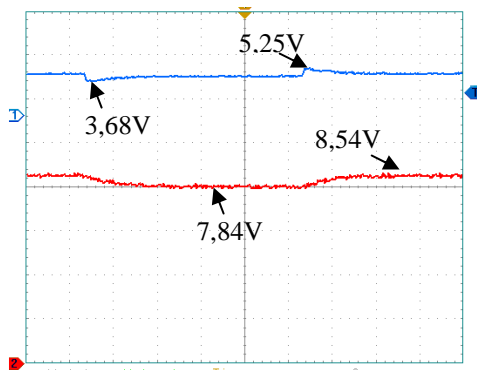
G_{RT} : fungsi alih regulator tegangan.

G_{GS} : fungsi alih generator sinkron 3 fasa.

ΔV_T : deviasi tegangan terminal generator.

E_f : deviasi tegangan lilitan medan.

Gambar 15 menunjukkan hasil uji coba sistem lup tertutup sistem eksitasi ini. Garis di bagian bawah menunjukkan sinyal tegangan terminal generator $y(t)$ dan garis di bagian atas adalah sinyal kontrol keluaran regulator tegangan. Sinyal referensi $r(t)$ diturunkan dari 8,54V secara fungsi step ke 7,84V, selang beberapa saat kemudian (sekitar 1 detik) dinaikkan lagi ke 8,54V. Hasil ini menunjukkan bahwa sinyal tegangan generator $y(t)$ dapat mengikuti sinyal referensi dengan selisih saat keadaan tunak 0V. Sinyal kontrol saat awal pada 5,25V kemudian turun ke 3,68V lalu naik lagi ke 5,25V. Hasil ini menunjukkan bahwa algoritma kontrol berfungsi dengan baik.



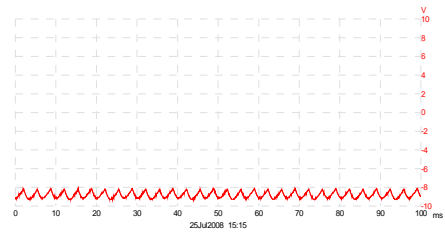
Gambar 15 Hasil uji coba simulasi sistem eksitasi lup tertutup.

Setelah fungsi modul-modul sesuai dengan keinginan, kemudian dilakukan eksperimen sistem eksitasi analog secara keseluruhan untuk membandingkan sistem kontrol tegangan analog baru yang dirancang bangun dengan kontroler

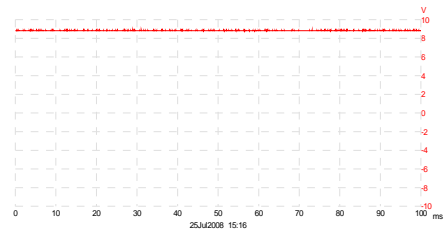
tegangan analog acuan. Hasil eksperimen kontroler tegangan acuan adalah hasil saat dioperasikan pada PLTA 8889 kVA. Eksperimen kontroler tegangan analog baru dilakukan dengan membuat simulasi di laboratorium yang mewakili keadaan nyata.

Gambar 16 adalah hasil pengukuran sinyal saat modul acuan dioperasikan pada PLTA. Gambar 16(a) adalah sinyal tegangan terminal generator yang diukur oleh modul pendeteksi tegangan. Sinyal ini menunjukkan -8V dengan puncak ripple -9V. Gambar 16(b) adalah sinyal referensi tegangan yang diukur pada titik keluaran modul pengesetan tegangan referensi. Sinyal ini bernilai 9,4V. Gambar 16(c) adalah sinyal keluaran rangkaian regulator tegangan yang bernilai -2,7V. Gambar 16 (d) adalah sinyal yang berhasil diukur pada sebuah titik di modul penguat penyesuai sebelum gain -0,5 dan sebelum ada efek offset -5Volt. Sinyal ini bernilai 3,2 V.

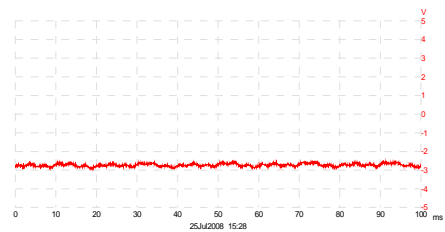
Gambar 17 adalah pengukuran sinyal kontroler tegangan analog hasil rancang bangun sendiri saat simulasi sistem di laboratorium. Untuk mendapatkan sinyal pengukuran tegangan terminal generator, telah dibuat transformer instrumentasi untuk merubah sinyal AC 3 fasa 380VAC menjadi sinyal yang sama dengan sinyal hasil pengukuran oleh modul pendeteksi tegangan terminal generator di PLTA. Untuk mendapatkan sinyal sinkronisasi telah dibuat transformer yang merubah sinyal AC 3 fasa 380VAC menjadi sinyal sinkronisasi 6 kanal (U,V,W,X,Y,Z) yang digunakan oleh modul regulator sudut penyalaaan. Untuk mendapatkan sinyal-sinyal analog masukan ke sistem eksitasi telah dibuat pembangkit sinyal yang dapat mensimulasikan sinyal-sinyal tersebut. Dari gambar 17 dapat disimpulkan bahwa kontroler tegangan hasil rancang bangun telah berfungsi dengan baik dan mengeluarkan sinyal sesuai dengan hasil kontroler acuan.



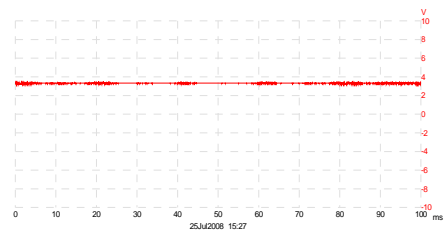
(a) Sinyal tegangan umpan balik.



(b) Sinyal referensi 9,4V.

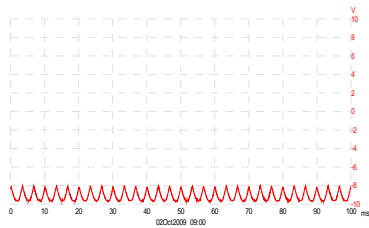


(c) Keluaran regulator tegangan -2,7V.

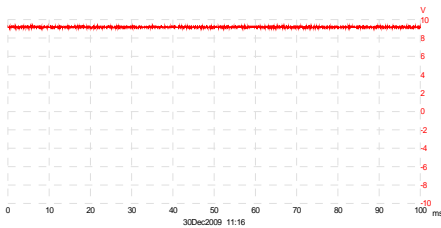


(d) Sinyal pada penguat penyesuai 3,2V.

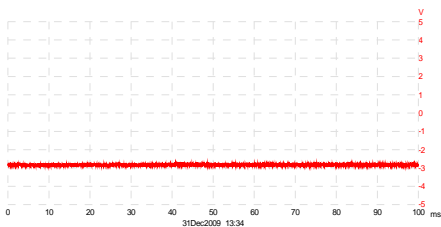
Gambar 16 Sinyal pengukuran kontroler acuan pada PLTA 8889kVA



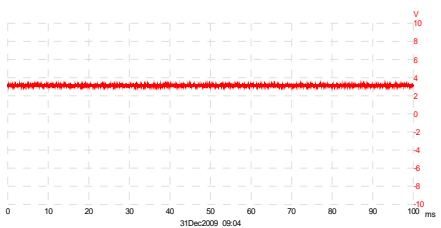
(a) Sinyal tegangan umpan balik.



(b) Sinyal referensi dari 9,4V.



(c) Keluaran regulator tegangan -2,7V.



(d) Sinyal pada penguat penyesuai 3,2V.

Gambar 17 Sinyal pengukuran kontroler baru pada uji coba simulasi

5. Kesimpulan dan saran

Dari hasil rancang bangun kontroler tegangan analog dan eksperimen pada

penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

- a. Modul pengeset tegangan referensi telah berfungsi dengan baik yaitu: (1) operator dapat menurunkan nilai referensi sampai batas minimal 0 Volt dan dapat menaikkan nilai referensi sampai batas maksimal 2,7 Volt (setara 30%), dan (2) saat kontroler tegangan otomatis mengambil alih kendali, keluaran bagian penjumlahan modul pengeset tegangan referensi sebesar 2,73 V (setara 30%) dan kemudian naik sampai 7,22V (setara 80%) selama 1,1 detik.
- b. Modul rangkaian penguat penyesuai telah berfungsi dengan baik yaitu: memetakan sinyal masukan $y(t)$ Volt ke sinyal keluaran $y_1(t)$ Volt sesuai dengan persamaan $y_1(t) = -0,5y(t) - 5$ dengan pembatas atas -1,67 Volt dan pembatas bawah -6,68 Volt. Pembatas atas diperoleh saat sinyal masukan -6,63 Volt atau kurang sedangkan pembatas bawah diperoleh saat sinyal masukan 3,3 Volt atau lebih.
- c. Modul rangkaian regulator sudut penyalan telah berfungsi dengan baik yaitu mengeluarkan pulsa penyalan yang memiliki spesifikasi: (1) lebar pulsa 0,83 milidetik (setara dengan 15 derajat listrik), (2) jarak antara dua pulsa berurutan 60 derajat listrik, dan (3) periode munculnya pulsa yang sama 20 milidetik (setara dengan 360 derajat listrik). Saat tanpa beban nilai atas pulsa adalah 4 Volt dan nilai bawah adalah 0 Volt (dengan tinggi 4 Volt) sedangkan saat dengan beban modul pemonitor nilai atas pulsa adalah 0,25 Volt dan nilai bawah pulsa adalah -2,75 Volt (dengan tinggi 3 Volt). Hal ini menunjukkan nilai tegangan catu daya untuk bagian penguat pulsa menentukan tinggi pulsa yang dialirkan ke transformer pulsa yang menyalakan gerbang thyristor.

- d. Modul rangkaian regulator tegangan telah berfungsi dengan baik dalam mengatur sinyal keluaran tegangan terminal generator mengikuti nilai tegangan referensinya.
- e. Pada saat diberikan sinyal referensi dan sinyal umpan balik yang nilainya sama dengan saat regulator acuan digunakan pada PLTA 8889kVA, regulator tegangan baru hasil rancang bangun memberikan nilai sinyal keluaran yang sama saat diujicoba pada simulasi di laboratorium.

Disarankan agar kontroler tegangan analog hasil rancang bangun ini diuji coba pada PLTA 8889 kVA, dan kemudian dikembangkan regulator tegangan versi digital menggunakan prosesor digital untuk mengaplikasikan algoritma-algoritma kontrol yang lebih canggih.

6. Daftar pustaka

- [1] Alhilal Hamdi (Komisaris Utama PT.PLN), *Krisi Listrik (Re)-Publik*, Koran Kompas, Jakarta, 14 November 2009, halaman 6.
- [2] Jajang Sumantri, *Beri Stimulus Bagi Pembangkit*, Koran Media Indonesia, Jakarta, 12 Januari 2009, halaman 13.
- [3] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali*, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 Tahun 2007, Jakarta, 29 Januari 2007.
- [4] Anonim, *Instruction Manual Thyristor Direct Exciting System, Main control unit type CDJ UICVX(Y)*, Fuji Electric Co.Ltd., Jepang, 1987.
- [5] Anonim, *Application of static excitation systems for pilot and rotating exciter replacements*, Basler Electric Company, Illinois USA, 2007.
- [6] Denkiakakai, *Power Electronics Circuit* (dalam bahasa Jepang), Ohmsha, Tokyo, 30 November 2000.