

## **RANCANG BANGUN REGULATOR TEGANGAN MANUAL DENGAN FITUR *INTERLOCK* UNTUK PLTA KAPASITAS 9MVA**

### ***DESIGN OF MANUAL VOLTAGE REGULATOR WITH INTERLOCK FEATURE FOR 9 MVA HEPP***

Estiko Rijanto

Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik (Puslit TELIMEK),

Lembaga Ilmu Pengetahuan Indonesia

Jl.Cisitu No.21/154D, Tel.022-2503055, Bandung 40135

[estiko.rijanto@lipi.go.id](mailto:estiko.rijanto@lipi.go.id)

#### **ABSTRAK**

Beberapa Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) di Indonesia yang telah dioperasikan lebih dari satu dekade masih memakai kontroler tegangan analog yang diimpor dari luar negeri. Berhentinya produksi kontroler tersebut mengancam kesinambungan operasi PLTA yang bersangkutan. Tujuan penelitian ini adalah untuk merancang bangun sebuah unit regulator tegangan manual (*manual voltage regulator*: MVR) yang memiliki fitur *interlock* menggunakan rangkaian elektronik analog untuk sistem eksitasi statik pada pembangkit listrik tenaga air (PLTA) berkapasitas 9MVA. Fungsi *interlock* ini adalah untuk memuluskan perubahan mode operasi dari mode otomatis memakai *automatic voltage regulator* (AVR) ke mode manual memakai MVR atau sebaliknya. Kontroler ini tersusun oleh beberapa modul utama yaitu: (a) pengeset arus medan, (b) sensor arus medan, (c) regulator arus medan, (d) penguat penyesuai, (e) unit gerbang penyalan jembatan thyristor, (f) pemonitor pulsa dan (g) rangkaian *interlock*. Unit MVR analog hasil rancang bangun telah diujicoba pada eksperimen simulasi dan dapat bekerja dengan baik memenuhi spesifikasi.

Kata Kunci: PLTA, regulator tegangan manual, regulator arus medan, *interlock*.

#### **ABSTRACT**

*Some hydro electrical power plants (HEPP) which have been operated in Indonesia for more than one decade still use analog voltage controllers imported from abroad. Production discontinuity of such controllers threatens those hydro electrical power generation plants' operation. The aim of this paper is to develop a manual voltage regulator (MVR) using analog electronic circuit for static excitation system used in power generation plants with capacity of 9MVA. The developed analog manual voltage regulator consists of some main electronic modules such as: (a) reference current setter, (b) field current sensor, (c) field current regulator, (d) matching amplifier, (e) gate unit, (f) pulse monitoring and (g) interlock circuit. The developed manual voltage regulator has been tested using experimental simulator and it is proved working well satisfying the specification.*

*Keywords: HEPP, manual voltage regulator, field current regulator, interlock.*

## PENDAHULUAN

### Latar Belakang

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<sup>[1]</sup>. Untuk memenuhi standar yang ada, pada setiap pembangkit listrik diperlukan kontrol frekuensi dan kontrol tegangan.

Pembangkit listrik di Indonesia yang dibangun akhir-akhir ini sudah memakai sistem eksitasi statik dengan teknologi digital pada sistem kontrol tegangannya. Beberapa kontroler tegangan digital yang tersedia di pasar internasional misalnya produk-produk dari Basler <sup>[2][3]</sup>, ABB <sup>[4]</sup>, VA Tech GmbH <sup>[5]</sup>, Alstom <sup>[6]</sup>, GE Energy <sup>[7]</sup>, dan Hitachi <sup>[8]</sup>.

Namun, banyak PLTA di Indonesia yang dibangun lebih dari satu dasa warsa lalu masih beroperasi 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 <sup>[9][10]</sup>.

Mengganti kontroler tegangan analog tersebut menjadi kontroler tegangan digital pada

sistem eksitasi statik biasanya mensyaratkan *full/semi full upgrade* sistem eksitasinya yang mungkin memerlukan biaya mahal dan menuntut perubahan kebiasaan kerja operator dan tenaga pemeliharaan. Oleh karenanya, penggunaan kontroler tegangan analog yang mempertahankan konfigurasi awal tanpa harus melakukan *full/semi full upgrade* kadang kala masih menjadi pilihan yang lebih rasional.

Pada prakteknya di sebuah PLTA perlu dipasang MVR dan AVR bersamaan dimana MVR berfungsi sebagai cadangan dengan status “siap siaga”. Jika tiba-tiba terjadikegagalan operasi kartu AVR maka kartu MVR dapat mengambil alih operasi dengan mulus. Sebaliknya perubahan mode operasi dari kartu MVR ke kartu AVR juga harus berjalan mulus. Untuk menjamin kelulusan perubahan mode operasi antara “mode otomatis” dan “mode manual” diperlukan fitur *interlock*.

### Tujuan

Tujuan makalah ini adalah untuk melaporkan rancang bangun regulator tegangan manual memakai rangkaian analog untuk PLTA yang menggunakan generator sinkron 3 fasa. Regulator tegangan manual ini dirancang bangun agar memiliki fungsi dan spesifikasi sesuai kebutuhan. Fungsi dan spesifikasi dicek melalui ujicoba di laboratorium.

Kemampuan rancang bangun dalam negeri perlu ditingkatkan untuk meningkatkan kemandirian teknologi kelistrikan nasional.

## METODOLOGI

### Objek Penelitian

Objek dari penelitian ini adalah regulator tegangan terminal generator yang memakai sistem eksitasi statik. Generator yang dikontrol tegangannya berupa generator sinkron (GS) 8889 kVA, 6,3kV/50Hz. Perputaran 500 rpm, jumlah kutub 12 dan faktor daya 0,9. Generator ini digunakan pada sebuah PLTM yang mulai beroperasi pada tahun 1995 dan memakai teknologi akhir 1980-an untuk kontroler tegangannya<sup>[9][10]</sup>.

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 regulator tegangan manual untuk digunakan sebagai sinyal sinkronisasi bagi pengaturan pulsa penyalan thyristor.

Sebuah *current transformer* (CT) dipakai untuk mengukur arus lilitan medan. Transformer instrumentasi ini memiliki spesifikasi 1000A/1A. Sinyal dari CT ini dibaca oleh rangkaian sensor arus medan untuk dipakai sebagai sinyal umpan balik oleh MVR.

### Rancang Bangun MVRL.

Pada penelitian ini digunakan jembatan thyristor gelombang penuh yang menggunakan 6 buah thyristor sebagai penyearah<sup>[11]</sup>.

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. Untuk jembatan thyristor gelombang penuh, tegangan lilitan medan diberikan oleh persamaan (1)<sup>[12]</sup>.

$$E_f = 1,35E_s \cos(\alpha) \quad (1)$$

Dimana:

$E_f$ : Tegangan lilitan medan (Volt)

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

$\alpha$ : sudut penyalan (Radian).

Tegangan lilitan medan  $E_f$  dapat dikontrol dengan mengatur nilai sudut penyalan  $\alpha$  pada jembatan thyristor gelombang penuh.

Setelah melalui transformasi koordinat memakai metoda *Park's transform* dan linearisasi model dinamika memakai metoda *Taylor's expansion*, diperoleh fungsi alih dari tegangan lilitan medan  $E_f$  ke tegangan terminal generator sinkron tiga fasa  $V_t$  seperti pada persamaan (2)<sup>[13]</sup>.

$$\frac{\Delta V_t}{\Delta E_f} = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s + b_0}{s^4 + a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (2)$$

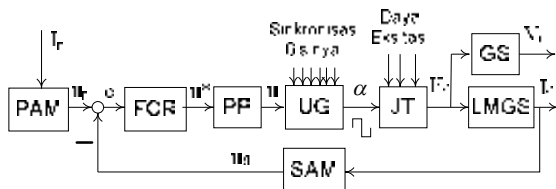
Sebuah regulator tegangan otomatis (AVR : *automatic voltage regulator*) dapat dirancang bangun dengan mengukur sinyal tegangan terminal generator sebagai sinyal umpan balik, dan mengatur nilai tegangan lilitan medan untuk mengontrol generator agar sesuai dengan nilai yang diinginkan<sup>[14][15]</sup>.

Sebuah regulator tegangan manual (MVR: *manual voltage regulator*) perlu dirancang bangun agar sistem dapat juga dioperasikan secara manual. MVR membaca arus lilitan medan sebagai sinyal umpan balik dan mengatur sudut penyalan thyristor untuk mengontrol tegangan lilitan medan. Hubungan arus lilitan medan dan tegangan lilitan medan diberikan oleh fungsi alih pada persamaan (3).

$$\frac{I_f(s)}{E_f(s)} = \frac{1}{L_f s + R_f} \quad (3)$$

Dari (2) dan (3) dapat dilihat bahwa dengan mengontrol arus lilitan medan maka tegangan terminal generator dapat dikontrol.

Gambar 1 menunjukkan diagram kotak sistem kontrol tegangan memakai MVR pada makalah ini.



Gambar 1. Sistem kontrol memakai MVR.

Penguat penyesuai (PP) menyesuaikan level sinyal kontrol  $u^*$  (Volt) keluaran *Field Current Regulator* (FCR) agar dapat diproses oleh unit gerbang (UG). Unit gerbang merubah sinyal kontrol  $u$  (Volt) menjadi informasi sudut penyalan  $\alpha$  (Radian) relatif terhadap sinyal sinkronisasi yang berasal dari jaringan untuk menyalakan thyristor pada jembatan thyristor (JT). Keluaran JT berupa tegangan lilitan

medan  $E_f$ (Volt) yang menentukan nilai tegangan terminal  $V_t$ (Volt) dari generator sinkron (GS) dengan cara mengalirkan arus listrik  $I_f$  ke lilitan medan generator sinkron (LMGS). Arus lilitan medan dimonitor memakai sensor arus medan (SAM) yang mengkonversi arus lilitan medan  $I_f$  (Ampere) ke sinyal umpan balik arus  $u_{fb}$  (Volt). Pengeset arus medan (PAM) mengkonversi nilai arus lilitan medan yang dimasukkan oleh operator  $I_r$  (Ampere) menjadi sinyal arus referensi  $u_r$  (Volt). Tabel 1 menunjukkan spesifikasi nilai sinyal untuk perancangan sistem kontrol memakai MVR pada makalah ini.

Tabel 1. Spesifikasi nilai sinyal.

$\alpha$ (Rad.)	$E_f$ (V)	$u$ (V)	$u^*$ (V)	Ket.
0	$1,35E_s$	0	-10	$E_f$ maks.
$0,5\pi$	0	-5	0	$E_f$ nol
$\pi$	$-1,35E_s$	-10	10	$E_f$ min.

Fungsi alih sensor arus medan diberikan oleh persamaan (4).

$$SAM(s) = \frac{u_{fb}(s)}{I_f(s)} = \frac{1,41\beta}{RCs+1} \quad (4)$$

Dimana:  $\beta$  melambangkan gain sensor arus dan  $RC$  melambangkan konstanta waktu rangkaian filter pada sensor arus.

Pada makalah ini FCR diberikan oleh fungsi alih pada persamaan (5).

$$FCR(s) = \frac{u^*(s)}{e(s)} = (K_p + \frac{K_i}{s})e(s) \quad (5)$$

Dimana:  $K_p$  adalah gain proporsional,  $K_i$  adalah gain integral, dan  $e$  (Volt) adalah nilai selisih antara  $u_r$  dan  $u_{fb}$ .

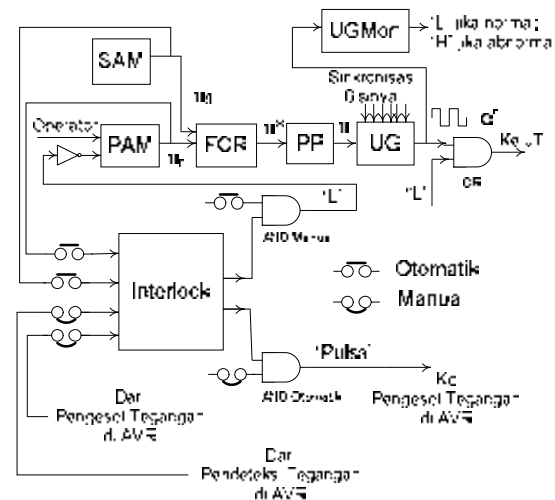
Dari persamaan (1), (3), (4) dan (5), dengan asumsi konstanta waktu rangkaian filter sensor arus relatif kecil dan memperhatikan spesifikasi nilai  $\alpha$  pada tabel 1, maka diperoleh

$$\frac{E_f(s)}{u_r(s)} = \frac{-0,135E_s(L_fK_p s^2 + (L_fK_i + R_fK_p)s + R_fK_i)}{L_f s^2 + (R_f + 0,135E_s \times 1,41\beta K_p)s + (0,135E_s K_i \times 1,41\beta)} \quad (6)$$

Modul rangkaian PAM, SAM, FCR, PP dan UG dibuat dalam sebuah kartu elektronik dan untuk kemudahan penamaan kartu tersebut dipanggil kartu MVR. Pada prakteknya kartu MVR dipasang bersamaan dengan kartu AVR di sebuah PLTA sebagai cadangan dengan status “siap siaga”. Jika tiba-tiba terjadi kegagalan operasi kartu AVR maka kartu MVR dapat mengambil alih operasi dengan mulus. Sebaliknya perubahan mode operasi dari kartu MVR ke kartu AVR juga harus berjalan mulus.

Untuk menjamin kelulusan perubahan mode operasi antara “mode otomatis” dan “mode manual”, pada kartu MVR ditambahkan sebuah modul *interlock*. Gambar 2 menunjukkan diagram kotak kartu MVR dilengkapi dengan modul *interlock*. Untuk memonitor fungsi kartu MVR dilengkapi dengan modul pemonitor pulsa keluaran unit gerbang UGMon. Jika kartu MVR berfungsi normal maka UGMon mengeluarkan sinyal Low (“L”) dan jika tidak normal maka UGMon mengeluarkan sinyal High (“H”) ke indikator.

fungsi alih dari sinyal referensi arus ke tegangan lilitan medan generator sinkron seperti pada persamaan (6).



Gambar 2. Diagram kotak MVR dengan *Interlock*.

Pada saat sistem dioperasikan pada “mode manual”, status sinyal keluaran AND Manual dari *Interlock* selalu Low (“L”), setelah melalui *inverter* menjadi High (“H”), sehingga modul pengeset arus medan (PAM) dapat memproses nilai referensi yang dimasukkan oleh operator dan mengeluarkan sinyal referensi arus  $u_r$  ke modul regulator arus medan (FCR). Modul regulator arus medan juga menerima sinyal arus medan  $u_{fb}$  dari modul pendeteksi arus medan (SAM) yang berasal dari sensor arus medan. Modul *interlock* menerima sinyal dari modul pendeteksi tegangan  $V_t$  di AVR sebagai sinyal referensi tegangan dan sinyal dari modul pengeset tegangan  $V_s$ , dan memproduksi pulsa yang dikirim ke modul pengeset tegangan di

AVR untuk menurunkan dan menaikkan tegangan  $V_s$  agar diperoleh  $V_s = V_t$ . Dengan cara demikian perubahan dari mode manual ke mode otomatis dapat berjalan mulus.

Pada saat sistem dioperasikan pada “mode otomatis”, tegangan terminal generator dikontrol oleh kartu AVR sedangkan modul-modul pada kartu MVR yang efektif bekerja adalah PAM, SAM dan *Interlock*. Sinyal yang masuk ke PAM dari antar muka operator di-*pull-up* agar selalu High (“H”). Modul *interlock* menerima sinyal  $u_{fb}$  dari modul SAM sebagai sinyal referensi arus dan sinyal  $u_r$  dari PAM. Modul *Interlock* memproduksi pulsa sehingga keluaran AND Manual dari *Interlock* yang masuk ke PAM berupa pulsa untuk menurunkan atau menaikkan  $u_r$  secara otomatis agar diperoleh  $u_r = u_{fb}$ . Dengan cara demikian perubahan dari mode otomatis ke mode manual dapat berjalan mulus.

Modul rangkaian PAM tersusun oleh modul antar muka dan modul penjumlah seperti diilustrasikan pada gambar 3. Modul antar muka memiliki generator pulsa, 2 kanal inputan dari operator (naik dan turun), 2 kanal inputan dari interlock (naik dan turun), pembatas atas, pembatas bawah, rangkaian sintesa logika sinyal (inputan, generator pulsa, pembatas), *reversible counter* 10 bit, dan D/A *converter* 10 bit. Modul antar muka bekerja dengan logika sebagai berikut.

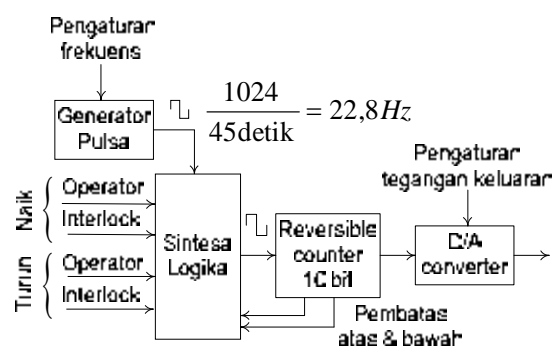
[Kasus operator menaikkan nilai referensi:]

Jika kanal inputan naik dari *interlock* “L” dan jika pembatas atas kurang dari 1024 maka: jika kanal inputan naik dari operator

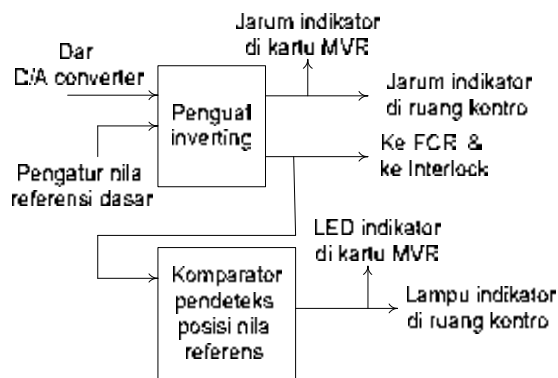
ditekan (“H”), counter akan menghitung jumlah pulsa naik dari generator pulsa.

[Kasus operator menurunkan nilai referensi:]

Jika kanal inputan turun dari *interlock* “L” dan jika pembatas bawah lebih dari 0 maka: jika kanal inputan turun dari operator ditekan (“H”), counter akan menghitung jumlah pulsa turun dari generator pulsa.



(a) Modul antar muka



(b) Modul penjumlah.

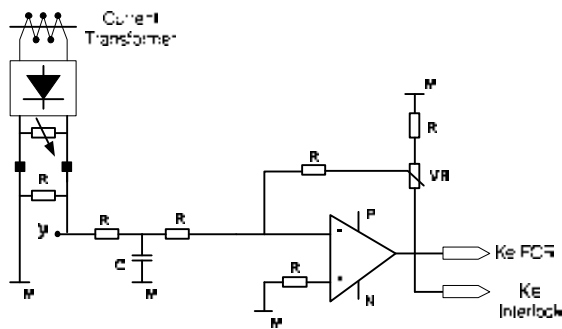
Gambar 3. Ilustrasi rangkaian PAM.

Kecepatan naik atau turunnya nilai referensi dapat diatur dengan mengatur frekuensi generator pulsa. Misalnya: diinginkan nilai referensi naik dari 0 sampai 1024 selama 45 detik, maka frekuensi generator pulsa diset agar 22,8 Hz. Sinyal digital keluaran counter

dikonversi oleh D/A *converter* menjadi sinyal analog 0 sampai -10 (V).

Modul penjumlah menerima sinyal analog referensi operator dari modul antar muka lalu menjumlahkannya dengan sinyal referensi dasar. Nilai tegangan referensi total berkisar 0V sampai dengan 10V.

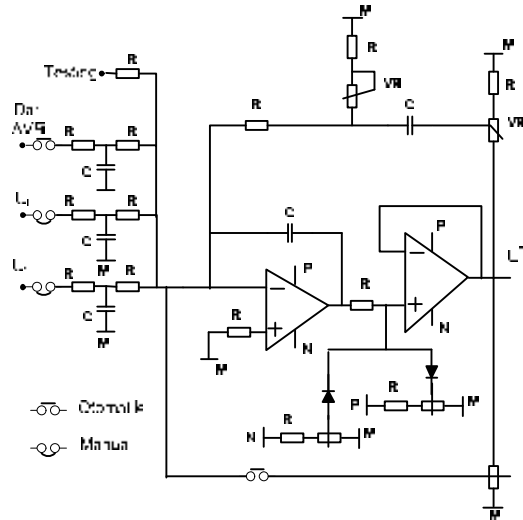
Modul rangkaian SAM tersusun oleh *current transformer* (CT), penyearah, dan pengkondisi sinyal. Rangkaian ini dibuat agar memenuhi persamaan (4). Gambar 4 menunjukkan rangkaian SAM.



Gambar 4. Rangkaian SAM.

Modul rangkaian regulator arus medan FCR merupakan modul yang merealisasikan persamaan (5). Seperti ditunjukkan pada gambar 5, modul ini memiliki 3 bagian yaitu: (1) bagian penjumlahan, (2) bagian algoritma, dan (3) bagian pembatas nilai sinyal keluaran. Bagian penjumlahan menerima sinyal referensi arus medan dan sinyal umpan balik dari rangkaian pendeteksi arus medan kemudian menghitung selisih antara dua sinyal tersebut. Sinyal selisih ini diproses memakai rangkaian algoritma kontrol umpan balik untuk menghitung sinyal kontrol yang dikeluarkan ke

modul penguat penyesuai. Sebagai contoh sinyal keluaran modul FCR dibatasi  $-6,7(V) \leq u^* \leq 6,7(V)$ .

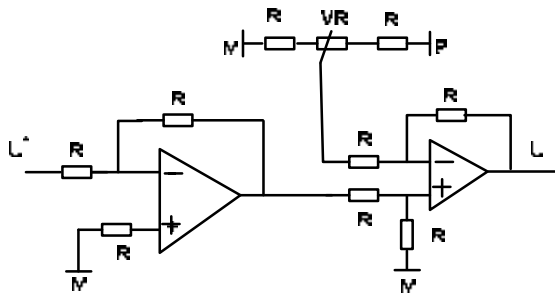


Gambar 5. Rangkaian FCR.

Pada saat sistem beroperasi pada mode manual, sinyal dari AVR terputus dan rangkaian algoritma menerima sinyal  $u_r$  dan  $u_{fb}$  untuk diproses dan dikeluarkan sebagai sinyal  $u^*$ . Gain proporsional dan gain integral dapat diatur masing-masing memakai potensiometer  $VR$ . Pembatas atas (6,7 (V)) dan pembatas bawah (-6,7 (V)) masing-masing dapat diatur memakai potensiometer  $VR$ . Pada saat sistem beroperasi pada mode otomatis, sinyal  $u_r$  dan  $u_{fb}$  terputus, dan sinyal dari AVR diteruskan secara langsung (*bypass*) ke sinyal  $u^*$  tanpa melewati rangkaian algoritma.

Modul rangkaian penguat penyesuai PP direalisasikan oleh rangkaian pada gambar 6. Rangkaian ini memetakan spesifikasi nilai sinyal pada tabel 1 yaitu dari  $u^*$  ke  $u$  seperti diberikan oleh persamaan (7).

$$u = -0,5u^* - 5 \quad (7)$$



Gambar 6. Rangkaian penguat penyesuai.

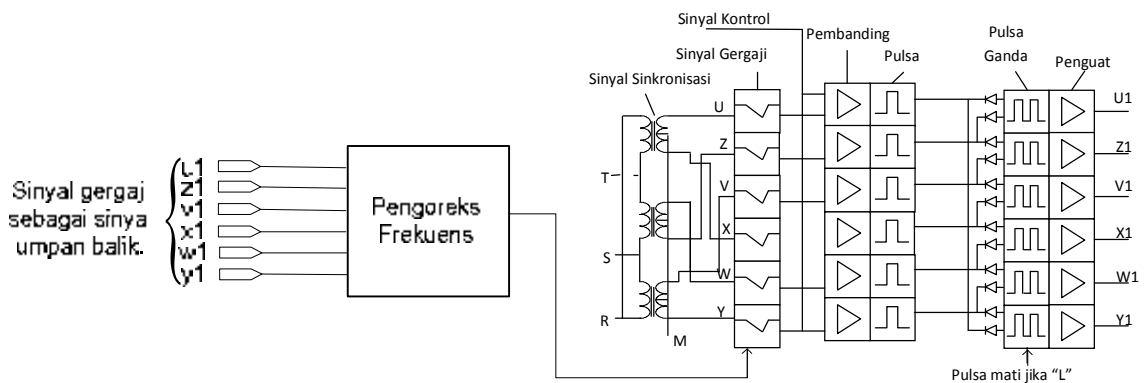
Modul rangkaian unit gerbang **UG** memetakan sinyal kontrol  $u$  ke sudut penyalan thyristor  $\alpha$  (Radian) relatif terhadap sinyal sinkronisasi untuk meralisasikan spesifikasi nilai sinyal pada tabel 1. Sudut 0 sampai dengan kurang dari  $0,5\pi$  (Rad.) berarti tegangan lilitan medan (tegangan eksitasi) bernilai positif, sudut  $0,5\pi$  (Rad.) berarti tegangan eksitasi bernilai nol, dan sudut lebih dari  $0,5\pi$  (Rad.) sampai  $\pi$  (Rad.) berarti tegangan eksitasi bernilai negatif.

Gambar 7 menunjukkan skema rangkaian unit gerbang UG beserta pengoreksi frekuensi. Unit gerbang tersusun oleh: (1) pembangkit sinyal gergaji yang memiliki fungsi

integral, (2) pembanding yang membandingkan sinyal kontrol  $u$  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.

Pulsa penyalan keluaran modul UG memiliki lebar pulsa 10 derajat sampai 15 derajat listrik dengan jarak antar dua pulsa 60 derajat listrik.

Parameter fungsi integral pada pembangkit sinyal gergaji diset tetap agar nilai absolut maksimum sinyal gergaji 10V pada frekuensi 50 Hz. Jika frekuensi naik lebih dari 50 Hz nilai maksimum akan melebihi 10 V, dan sebaliknya jika frekuensi turun di bawah 50 Hz nilai maksimum akan kurang dari 10V. Pengoreksi frekuensi dibuat untuk mengkompensasi agar nilai maksimum sinyal gergaji tetap 10 (V) meski terjadi perubahan frekuensi.



Gambar 7. Skema rangkaian unit gerbang dengan pengoreksi frekuensi.



Gambar 8 menunjukkan kartu MVR yang telah dibuat. Kartu MVR ini telah diujicoba memakai simulator pengujian di laboratorium. Konfigurasi simulator pengujian adalah sbb: (1) kartu MVR (objek uji coba), (2) panel berisi potensiometer dan switch untuk mensimulasikan sinyal masukan analog dan sinyal masukan digital (on/off), (3) transformer sinkronisasi pulsa penyalan thyristor, (4) catu daya, (5) tombol naik dan tombol turun untuk menaikkan dan menurunkan arus referensi.



Gambar 8. Kartu MVR yang telah dibuat.

Analog input, digital input, analog output dan digital output pada kartu MVR ini dirangkum pada tabel 2. Dari tabel diketahui bahwa regulator tegangan manual ini memiliki 6 kanal sinyal masukan digital, 9 kanal sinyal masukan analog, 11 kanal sinyal keluaran digital, dan 2 kanal sinyal keluaran analog.

**Tabel 2.** Rangkuman sinyal input dan output.

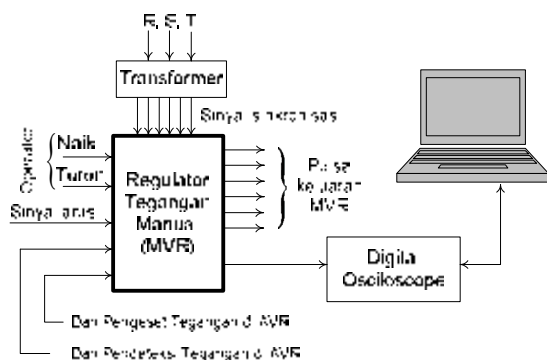
Sinyal	Keterangan
Tombol naik (DI)	Sinyal digital masuk ke modul PAM dari operator.
Tombol turun (DI)	
Tombol naik (DI)	Sinyal digital masuk ke modul PAM dari modul interlock.
Tombol turun (DI)	
Indikator pembatas referensi ( 2 DO)	Sinyal digital keluaran dari modul PAM.
Sinyal indikator referensi (AO)	Sinyal analog keluaran modul PAM.
Sinyal indikator referensi (DO)	Sinyal digital keluaran modul PAM.
Arus medan (AI)	Masuk ke modul SAM dari CT.
Sinyal AVR (AI)	Sinyal analog keluaran kartu AVR masuk modul FCR.
Sinyal untuk testing (AI)	Sinyal analog untuk pengetesan fungsi FCR.
Auto/Manual (DI)	Sinyal pilihan mode “otomatik” atau “manual”. Masuk ke FCR, UG dan UGMon serta Interlock.
Sinyal sinkronisasi (6AI)	Masuk ke modul UG.
Pulse (6 DO).	Keluaran modul UG.
Sinyal indikator gagal pulsa (DO).	Keluaran modul UGMon untuk indikasi pulsa normal/abnormal.
Pilihan interlock (DI).	Pilihan Use/No Use masuk ke modul Interlock.
Dijital output (DO).	Indikator balance dari Interlock.
Analog output (AO).	Indikator balance dari Interlock.

Catatan: DI= digital input, DO= digital output, AI= analog input, AO= analog output.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Gambar 9 menunjukkan skema eksperimen yang dilakukan untuk menguji fungsi regulator tegangan manual (MVR) yang telah dirancang bangun. Elemen utama dari skema ini adalah MVR, osiloskop digital dan Laptop. Osiloskop dan Laptop difungsikan

sebagai perekam sinyal dengan cara mengukur sinyal tegangan memakai test point sesuai tempat yang dibutuhkan. Terdapat tombol bagi operator untuk menaikkan dan menurunkan nilai arus referensi, dan tersedia sinyal masukan arus medan. Transformator berfungsi untuk mensimulasikan sinyal sinkronisasi 6 kanal dari sumber tegangan AC 3 fasa. Untuk mengecek fungsi *interlock* disediakan simulasi sinyal masukan dari AVR.



Gambar 9. Skema eksperimen

Di bawah ini ditunjukkan hasil-hasil eksperimen regulator tegangan manual 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:

- 1) Rangkaian pengeset arus medan (PAM).
- 2) Rangkaian pendeteksi arus medan (SAM).
- 3) Rangkaian regulator arus medan (FCR).
- 4) Rangkaian unit gerbang (UG) beserta pengoreksi frekuensi.
- 5) Modul pemonitor UGMon.
- 6) Modul interlock.

Dari hasil eksperimen diketahui bahwa modul PAM dapat menurunkan atau

menaikkan sinyal arus referensi saat tombol turun atau tombol naik ditekan oleh operator. Saat mencapai nilai maksimal keluaran D/A *converter* sebesar -10 (V) dan saat mencapai nilai minimal sebesar 0 (V). Berdasarkan hasil pengukuran saat PLTA objek penelitian dioperasikan pada daya 8,9MW 50Hz, sinyal referensi dasar pada modul penjumlahan telah diset sebesar -0,67 (V) dan sinyal keluaran modul antar muka telah diset -5,35 (V). Modul penjumlahan mengeluarkan sinyal 6,27 (V). Berarti nilai gain modul penjumlahan diperoleh -1,04.

Berdasarkan hasil pengukuran saat PLTA objek penelitian dioperasikan pada daya 8,9MW 50Hz, telah disimulasikan sinyal masukan y ke modul SAM sebesar 4,64 (V). Potensiometer telah diset sehingga modul SAM mengeluarkan sinyal -6,56 (V) ke modul FCR. Berarti diperoleh nilai gain modul SAM sebesar -1,4.

Uji coba di laboratorium terhadap modul FCR dilakukan untuk mengecek fungsi algoritma Proportional Integral (PI). Pengecekan dilakukan dengan pengujian *step response* secara lup terbuka. Gambar 10 menunjukkan sinyal keluaran modul FCR saat dilakukan uji coba *step response* dengan memasukkan sinyal step 0 (V) ke 1 (V) pada inputan testing.

Dari persamaan (5) dan gambar 10 dapat dilakukan analisis memakai persamaan (8) dan hasil pengukuran.

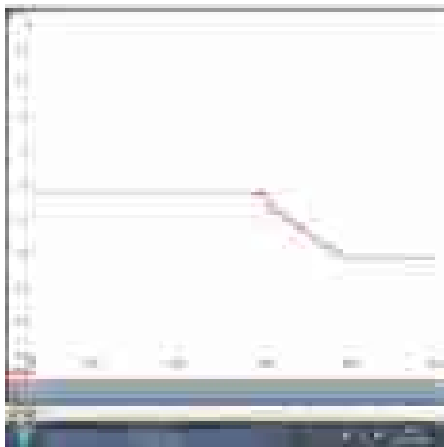
$$u^*(t) = -K_p e(t) - K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + u^*(0) \quad (8)$$

Dari pengukuran diketahui:

$$\begin{aligned}
 e(t; \forall t < 40,06) &= 0, \\
 e(t; \forall t \geq 40,06) &= 1, \\
 u^*(t; \forall 0 \leq t < 40,06) &= -0,99, \\
 u^*(40,06) &= -2,29, \\
 u^*(t; \forall t \geq 44,61) &= -8,63.
 \end{aligned}$$

Oleh karena itu diperoleh nilai gain  $K_p = 1,3$  dan  $K_i = 2,3$ .

Uji coba modul rangkaian penguat penyesuaian di laboratorium dilakukan untuk mengecek fungsi pemetaannya. Dengan mengeset gain  $-0,5$  dan bias  $-5$  (V) pada gambar 6 telah diperoleh fungsi pemetaan yang memenuhi persamaan (7).



Gambar 10. *Step response* modul FCR.

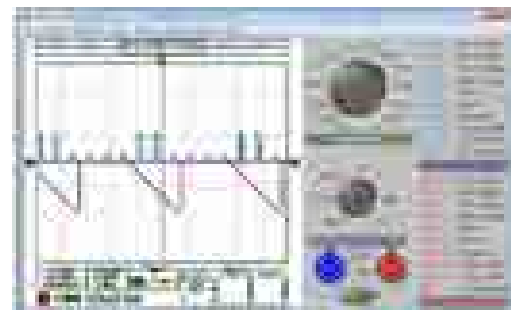
Uji coba modul UG dilakukan untuk mengecek fungsi pemetaan rangkaian UG. Sinyal gergaji dibentuk berdasarkan 2 sumber sinyal yaitu sinyal sinkronisasi dan sinyal pembentuk. Pada saat uji coba dilakukan, sinyal sinkronisasi dimasukkan ke 6 kanal inputan (U,V,W,X,Y,Z). Sinyal sinkronisasi menentukan sudut fasa pembentukan sinyal gergaji yaitu: 0 sampai dengan  $\pi$  berupa sinyal gergaji, dan antara  $\pi$  sampai dengan  $2\pi$  berupa

sinyal netral 0 (V). Sedangkan sinyal pembentuk menentukan tinggi tegangan maksimum sinyal gergaji. Sinyal pembentuk memiliki pembagi tegangan agar bisa diatur nilainya dan berasal dari modul pengoreksi frekuensi.

Gambar 11 s.d. gambar 13 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. Pada gambar 11(a), 12(a) dan 13(a) garis warna biru adalah sinyal input kontrol UG dan garis warna merah adalah sinyal gergaji. Pada gambar 11(b), 12(b) dan 13(b) garis warna biru adalah pulsa output UG dan garis warna merah adalah sinyal gergaji.



(a) Input kontrol UG dan sinyal gergaji.

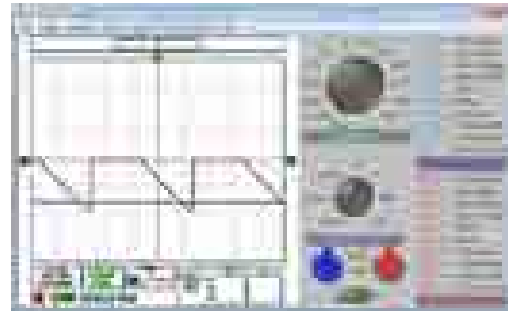


(b) Pulsa output UG dan sinyal gergaji.

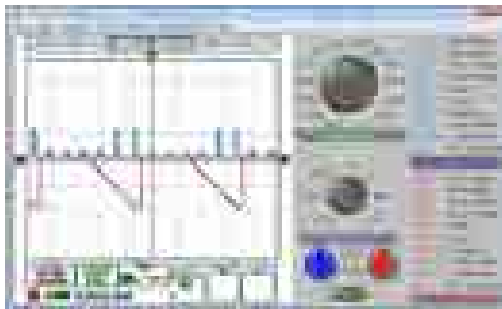
Gambar 11. Input dan output modul UG  
 (saat sinyal kontrol  $-1,72$  (V))



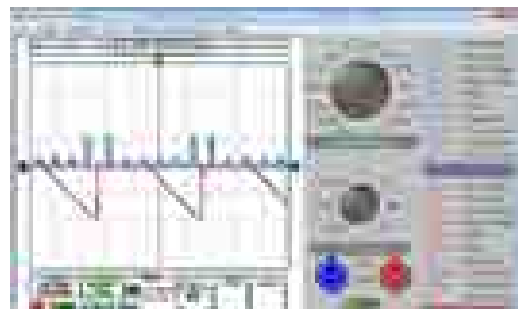
(a)Input kontrol UG dan sinyal gergaji.



(a)Input kontrol UG dan sinyal gergaji.



(b)Pulsa output UG dan sinyal gergaji.



(b)Pulsa output UG dan sinyal gergaji.

Gambar 12. Input dan output modul UG  
(saat sinyal kontrol -5 (V))

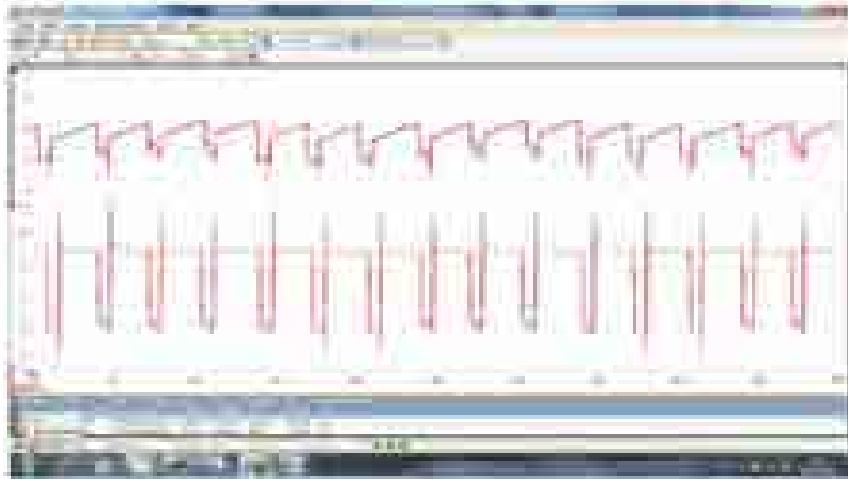
Gambar 13. Input dan output modul UG  
(saat sinyal kontrol -8,3 (V))

Ketika sinyal kontrol dirubah menurut urutan [-1,72; -5,0; -8,3] (V) telah diperoleh sudut pulsa penyalaaan  $[\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{2}; \frac{5}{6}\pi]$ . Dari hasil ini diperoleh hasil pemetaan  $u$  (Volt) ke sudut pulsa  $\alpha$  seperti pada persamaan (9).

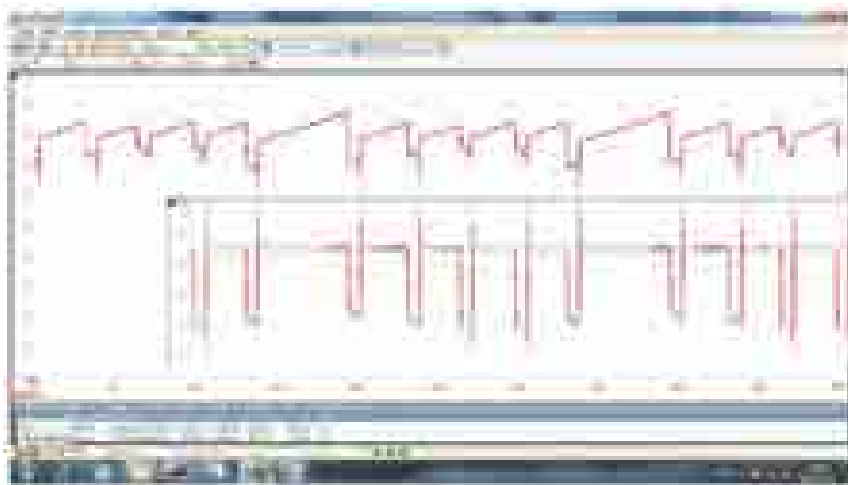
$$\alpha = -0,1\pi u \quad (9)$$

Dari hasil pengukuran pada gambar 11 s.d. gambar 13 juga diperoleh: frekuensi sinyal gergaji 49,75Hz dan 50 Hz, periode antara 2 pulsa yang berdekatan 3,3 mili detik, dan lebar pulsa 0,7 dan 0,8 mili detik.

Hasil uji coba modul UGMon ditunjukkan pada gambar 14 dan gambar 15. Pada masing-masing gambar, sinyal pulsa yang ditunjukkan pada bagian bawah adalah sinyal yang diukur pada basis transistor modul UG (yang merefleksikan sinyal pulsa keluaran modul UG), sedangkan sinyal pada bagian atas adalah sinyal di dalam modul UGMon yang masuk ke komparator pertama UGMon (yang merefleksikan sinyal keluaran UGMon).



Gambar 14. Pulsa masukan ke UGMon dan sinyal dalam UGMon (saat normal).



Gambar 15. Pulsa masukan UGMon dan sinyal dalam UGMon (saat keluaran UG kanal Y hilang).

Dari gambar 14 diketahui bahwa pada saat pulsa keluaran modul UG tidak ada yang hilang maka sinyal dalam sebelum komparator di UGMon tidak ada yang melebihi 7,5 (V). Dari hasil pengukuran dikonfirmasi UGMon mengeluarkan sinyal indikator "L" (0 Volt) yang berarti "normal". Dari gambar 15 diketahui bahwa pada saat pulsa keluaran modul UG ada yang hilang maka sinyal dalam sebelum komparator di UGMon ada yang melebihi 7,5 (V), dan UGMon mengeluarkan

sinyal indikator "H" (lebih dari 8 Volt) yang berarti "tidak normal".

Dari hasil uji coba modul interlock telah dikonfirmasi bahwa modul interlock pada prinsipnya berfungsi sebagai regulator yang mengatur nilai setting agar mengikuti nilai pengukuran. Modul interlock memiliki dua rangkaian yaitu algoritma umpan balik dan pembangkit pulsa dengan fitur *dead-band*. Algoritma umpan balik diberikan oleh formula:

$$u_i = -G_i(u_r - u_{fb}); e_i = u_{fb} - u_r$$

Dimana:  $e_i$  adalah selisih antara nilai pengukuran  $u_{fb}$  dan nilai pengesetan  $u_r$ ,  $G_i$  adalah gain proporsional yang diatur nilainya agar  $G_i = 0,5$ , dan  $u_i$  adalah sinyal kontrol umpan balik interlock. Sinyal kontrol umpan balik interlock mengontrol kerja pembangkit pulsa naik dan pulsa turun berdasarkan logika di bawah ini.

Jika  $u_i > 1(V)$  maka kanal keluaran pulsa naik aktif (Low) dan keluaran pulsa turun pasif (High).

Jika  $u_i < -1(V)$  maka keluaran pulsa naik pasif (High) dan keluaran pulsa turun aktif (Low).

Jika  $-1(V) \leq u_i \leq 1(V)$  maka keluaran pulsa naik pasif dan keluaran pulsa turun pasif.

## KESIMPULAN DAN SARAN

### Kesimpulan

Dari hasil eksperimen pada penelitian ini diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Semua modul rangkaian pada MVR yang telah dirancang bangun berfungsi dengan baik dan memenuhi spesifikasi.
2. Pada modul pengeset arus medan, nilai maksimal keluaran D/A *converter* sebesar -10 (V) dan nilai minimal sebesar 0 (V). Berdasarkan hasil pengukuran saat PLTA objek penelitian dioperasikan pada daya 8,9MW 50Hz, sinyal referensi dasar telah diset sebesar -0,67 (V) dan sinyal keluaran modul antar muka telah diset -5,35 (V). Modul penjumlahan mengeluarkan sinyal 6,27 (V), berarti nilai gain diperoleh -1,04.
3. Telah diketahui sinyal masukan ke modul SAM sebesar 4,64 (V), dan potensiometer diset sehingga modul SAM mengeluarkan

sinyal -6,56 (V) ke modul FCR, berarti diperoleh gain modul SAM sebesar -1,4.

4. Modul penguat penyesuai memetakan sinyal masukan ke sinyal keluaran sesuai dengan persamaan  $u = -0,5u^* - 5$ .
5. Modul regulator arus medan memiliki gain  $K_p = 1,3$  dan gain  $K_i = 2,3$ .
6. Modul unit gerbang memetakan sinyal masukan ke sinyal keluaran sesuai persamaan  $\alpha = -0,1\pi$ . Ketika sinyal masukan dirubah menurut urutan [-1,72; -5,0; -8,3] (V) telah diperoleh sudut pulsa penyalan  $[\frac{\pi}{6}; \frac{\pi}{2}; \frac{5}{6}\pi]$ . Frekuensi sinyal gergaji 50 Hz, periode antara 2 pulsa yang berdekatan 3,3 mili detik, dan lebar pulsa antara 0,7 dan 0,8 mili detik.
7. Modul pemonitor pulsa memproduksi sinyal dalam kurang dari 7,5 (V) dan mengeluarkan sinyal indikator Low saat pulsa keluaran unit gerbang normal, sebaliknya ia memproduksi sinyal lebih dari 7,5 (V) dan mengeluarkan sinyal indikator High saat pulsa keluaran unit gerbang abnormal.
8. Modul *interlock* memiliki gain umpan balik 0,5 dan area *dead band* -1 (V) s.d. 1 (V). Jika sinyal kontrol umpan balik *interlock*  $u_i$  lebih dari 1 (V) maka mengeluarkan pulsa naik, jika  $u_i < -1(V)$  maka mengeluarkan pulsa turun, dan jika  $-1(V) \leq u_i \leq 1(V)$  maka tidak mengeluarkan pulsa.

## Saran

Disarankan agar regulator tegangan manual hasil rancang bangun yang telah diuji di laboratorium ini dipasang di PLTA yang memiliki generator sinkron dan sistem eksitasi sesuai spesifikasi pada makalah ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, 2007, Aturan Jaringan Sistem Tenaga Listrik Jawa-Madura-Bali, Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 3 Tahun 2007, Kementrian ESDM RI, Jakarta 29 Januari.
- [2] Basler Electric, 2011, *ECS2100 Excitation Control Systems*, [online], [www.basler.com](http://www.basler.com) [diunduh 7 Juli 2011].
- [3] Basler Electric, 2011, *DECS-400 Digital Excitation Control Systems*, [online], [www.basler.com](http://www.basler.com) [diunduh 7 Juli 2011].
- [4] ABB Switzerland Ltd., 2010, *Unitrol 6800 Excitation Systems*, [online], [www.abb.com](http://www.abb.com), [upload 28/10/2010, diunduh 7/7/ 2011].
- [5] VA Tech Sat GmbH & Co., 2011, *Neptun*, [Brosur online], [www.andritz.com](http://www.andritz.com) [diunduh 7 Juli 2011].
- [6] Alstom, 2012, *Alspa ControGen HX Generator Control and Excitation System*, [Brosur online], [www.alstom.com/power/resources/brochure/alspa-controgen-hx-generator-control/](http://www.alstom.com/power/resources/brochure/alspa-controgen-hx-generator-control/) [diunduh 14 Jan. 2012].
- [7] GE Energy, 2012, *EX2100 Excitation System: Total Control Solutions with OEM Expertise*, [Brosur online], [www.ge-energy.com](http://www.ge-energy.com) [diunduh 14 Januari 2012].
- [8] Hitachi Ltd., 2010, *Hitachi Excitation System VCS-6000*, [Brosur online], [www.mdaturbines.com](http://www.mdaturbines.com) [upload May 2010, diunduh 14 Januari 2012].
- [9] Anonim, 1987, *Three Line Diagram (1) Power Unit W410157*, Fuji Electric Co.Ltd., Tokyo.
- [10] Anonim, 1987, *Instruction Manual: Thyristor Direct Exciting System, Manual control and automatic following up CDJ UIPVX(Y)*, Fuji Electric Co.Ltd., Tokyo.
- [11] Anonim, 2007, *Application of static excitation systems for pilot and rotating exciter replacements*, Basler Electric Company, Illinois USA.
- [12] Denkiagakai, 2000, *Power Electronics Circuit* (bahasa Jepang), Ohmsha, Tokyo.
- [13] Estiko Rijanto, 2009, Perancangan Regulator Tegangan Generator Sinkron 3 Fasa Berbasis Model Matching, Jurnal Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Vol.8, No.1, halaman 1-11.
- [14] Estiko Rijanto, 2009, Rancang Bangun Kontroler Tegangan Analog untuk Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA) dengan Generator Sinkron 3 Fasa Kapasitas 9MVA, Jurnal INKOM, Vol.III, No.1-2, halaman 76-89.
- [15] Estiko Rijanto dan Anwar Muqorobin, 2011, Rancang Bangun Modul Pengkondisi Sinyal & Antar Muka untuk Kontroler Tegangan Digital Pada Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA), Jurnal Ketenagalistrikan dan Energi Terbarukan, Vol.10, No.1, halaman 61-74.