

KARAKTERISASI NONLINEAR PENGUAT DAYA GELOMBANG MIKRO GaAs HFET BERBASIS EKSITASI MULTINADA

Aip Saripudin¹

ABSTRAK: Karakterisasi nonlinear penguat daya gelombang mikro GaAs HFET telah dilakukan. Model GaAs HFET SHF0186K, yang digunakan untuk menurunkan parameter model Curtice-Ettenberg, telah diekstrak. Parameter model tersebut digunakan untuk mengarakterisasikan penguat daya gelombang mikro berbasis eksitasi multinada. Pada proyek ini, perilaku nonlinear penguat daya dalam berbagai tegangan gate-source juga dilakukan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah nada, semakin kecil ACPR.

ABSTRACT: A characterization of nonlinear behavior of GaAs HFET power amplifier has been done. The SHF0186K GaAs HFET model, which is used to derive Curtice-Ettenberg model parameter, was extracted. I used these model parameters to characterize the amplifier based on multitone simulation. In this project, I also investigate nonlinear behavior of amplifier under various gate-source voltages. The simulation results show that ACPR decrease as tone increase.

Kata kunci: *nonlinear, HFET, penguat daya, multinada, ACPR.*

PENDAHULUAN

Dari tahun ke tahun, pengguna sistem komunikasi nirkabel frekuensi radio dan gelombang mikro semakin meningkat pesat. Perkembangan ini disertai oleh semakin meningkatnya permintaan agar kinerja devais atau sistem telekomunikasi nirkabel semakin baik. Beberapa permintaan tersebut di antaranya: daya tinggi, linieritas tinggi, dan efisiensi tinggi. Mendapatkan kinerja devais atau sistem yang memenuhi ketiga permintaan itu bukanlah pekerjaan yang mudah. Tetapi, di situlah justru tantangannya. Para ilmuwan dan insinyur dituntut untuk bekerja ekstra keras.

Sementara itu, devais yang memegang peranan penting dalam sistem komunikasi nirkabel, yaitu transistor atau penguat daya gelombang mikro, memiliki sifat linier dan nonlinier sekaligus. Sifat nonlinier penguat daya gelombang mikro mengakibatkan sinyal-sinyal keluarannya mengalami distorsi (IMD) dan menghasilkan respon *spurious*. Pada sistem komunikasi multikanal padat, CDMA misalnya, IMD atau *spurious* dapat berinterferensi dengan sinyal transmisi lain pada kanal lain yang berdekatan. Akibatnya, kanal-kanal komunikasi dapat menyalurkan bagian sinyal dari kanal lain sehingga terjadi keadaan tumpang tindih dan tidak teratur.

Oleh karena itu, pada penguat daya, sifat nonlinier merupakan sifat yang tidak dikehendaki kemunculannya.

lebih kompleks (multinada) harus dianalisis. Hal ini menyebabkan standar IP3 dua-nada tidak cukup lagi untuk dijadikan nilai mutu yang baik.

Ketika metoda dua-nada tidak lagi mencukupi untuk dijadikan ukuran nilai mutu, tanda-tanda distorsi yang lebih kuat, seperti ACPR, harus dilibatkan dalam evaluasi kinerja linieritas penguat daya. ACPR adalah

Dengan kata lain, diperlukan suatu kajian atau teknik tertentu agar sifat nonlinier ini bisa diredam. Hal ini menjadi penting, karena memang tidak pernah ada devais yang hanya memiliki sifat linier.

Salah satu metoda untuk menyelidiki perilaku nonlinier pada penguat daya adalah analisis IMD. Ini merupakan parameter penting yang menunjukkan kinerja perilaku nonlinier transistor. Analisis IMD relatif telah dipelajari dengan baik, baik secara teoretis maupun eksperimental, melalui eksitasi dua-nada (*two-tone*). Metoda ini digunakan untuk mendapatkan titik perpotongan orde-3 (IP3) yang menjadi nilai mutu (*figure of merit*) linieritas penguat daya. Analisis ini dilakukan baik pada transistor bipolar maupun transistor efek medan (FET), dan hasil yang baik diperoleh untuk masukan-masukan dengan amplitudo sama.

Akan tetapi, karakterisasi IMD menggunakan metoda dua-nada hanya bermanfaat untuk mengarakterisasikan penguat yang dioperasikan jauh di bawah titik kompresi P_{1dB} . Jika penguat daya didorong beroperasi menuju daerah dekat titik kompresi, karena keterbatasan sifat transistor, penguatan transistor akan mulai menunjukkan arus *pinch-off* (dalam kasus FET). Banyak produk IMD kuat hadir di daerah ini. Apalagi pada sistem komunikasi gelombang mikro dan frekuensi radio modern, sinyal-sinyal yang perbandingan antara total daya kanal terdekat dan daya pita sinyal yang berguna.

Isu mengenai karakterisasi menggunakan masukan multinada sebenarnya telah didiskusikan dalam beberapa publikasi. Pekerjaan teoretis dan pengukuran IMD untuk analisis multinada telah dilaporkan oleh Carvalho dan Pedro dan Hajji *et al.* Carvalho dan Pedro menurunkan persamaan-persamaan

¹ Aip Saripudin adalah dosen pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro UPI

matematis untuk menghitung IMR dan level titik perpotongan untuk kondisi kerja yang berbeda. Sementara itu, Hajji *et al* telah mengajukan sistem pengukuran baru yang mengurangi kompleksitas sistem dengan menggunakan generator bentuk gelombang sebarang dan mixer sederhana untuk membangkitkan spektrum sejumlah nada yang diperlukan. Dengan menggunakan teknik ini, penggunaan banyak generator sinyal dan masalah sinkronisasi sinyal dapat dihindarkan.

Akan tetapi, meskipun isu multinada sudah dikemukakan, untuk mendapatkan nilai mutu yang menunjukkan kinerja devais secara nyata, atau setidaknya mendekati nyata, tetap masih merupakan kajian menarik yang harus terus dikembangkan. Diharapkan, suatu saat akan diperoleh metoda karakterisasi yang benar-benar mendekati kenyataan.

KARAKTERISASI NONLINEAR

Perilaku nonlinear behavior penguat daya gelombang mikro berasal dari karakteristik I-V transistor sebagai devais aktif. Secara umum, arus drain-source sebagai fungsi dari tegangan drain-source dan tegangan gate-source dapat dinyatakan dalam deret Taylor orde ke-3 sebagai berikut.

$$\begin{aligned} i_{ds} = & g_{m1}v_{gs} + g_{m2}v_{gs}^2 + g_{m3}v_{gs}^3 \\ & + g_{ds1}v_{ds} + g_{ds2}v_{ds}^2 + g_{ds3}v_{ds}^3 \\ & + m_{11}v_{gs}v_{ds} + m_{21}v_{gs}^2v_{ds} + m_{12}v_{gs}v_{ds}^2 \end{aligned} \quad (1)$$

dengan i_{ds} adalah arus drain-source, v_{gs} adalah tegangan gate-source, v_{ds} adalah tegangan drain-source, g_{m1} , g_{m2} , dan g_{m3} adalah transkonduktansi, g_{ds1} , g_{ds2} , and g_{ds3} adalah konduktansi output, m_{11} , m_{21} , and m_{12} adalah koefisien cross-term.

Analisis Dua Nada

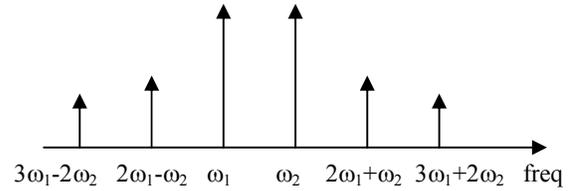
Analisis dua nada merupakan metode standar untuk mengarakterisasikan linearitas penguat daya. Pada metode ini, perilaku transistor dikarakterisasikan menggunakan dua dua sinyal dengan amplitude sama dan frekuensinya berbeda sedikit. Sinyal input, yakni tegangan gate-source, dapat dinyatakan oleh

$$v_{gs}(t) = A[\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t] \quad (2)$$

Untuk sederhananya, untuk menurunkan output penguat daya, anggap v_{ds} sama dengan nol. Ganti v_{gs} pada Persamaan (1) oleh Persamaan (2) dan gunakan identitas trigonometri umum, diperoleh

$$\begin{aligned} i_{ds} = & g_{m1}A[\sin \omega_1 t + \sin \omega_2 t] \\ & + g_{m2}A^2 \left[1 - \frac{1}{2} \cos 2\omega_1 t - \frac{1}{2} \cos 2\omega_2 t \right. \\ & \left. + \cos(\omega_1 - \omega_2)t - \cos(\omega_1 + \omega_2)t \right] \\ & + g_{m3}A^3 \left[\frac{9}{4} \sin \omega_1 t + \frac{9}{4} \sin \omega_2 t - \frac{1}{4} \sin 3\omega_1 t \right. \\ & \left. - \frac{1}{4} \sin 3\omega_2 t - \frac{3}{4} \sin(2\omega_1 - \omega_2)t \right. \\ & \left. - \frac{3}{4} \sin(2\omega_1 + \omega_2)t - \frac{3}{4} \sin(2\omega_2 - \omega_1)t \right. \\ & \left. - \frac{3}{4} \sin(2\omega_2 + \omega_1)t \right] \end{aligned} \quad (3)$$

Persamaan (3) menunjukkan bahwa arus drain-source mengandung komponen frekuensi DC, ω_1 , ω_2 , $2\omega_1$, $2\omega_2$, $3\omega_1$, $3\omega_2$, $\omega_1 \pm \omega_2$, $2\omega_1 \pm \omega_2$, and $2\omega_2 \pm \omega_1$. Gambar 1 menunjukkan ilustrasi spektrum output penguat karena nonlinearisasinya untuk pengukuran dua nada.



Gambar 1 Spektrum output untuk dua nada.

Seperti telah disinggung sebelumnya, karakterisasi nonlinear menggunakan metode dua nada hanya berguna untuk mengarakterisasikan penguat yang beroperasi jauh di bawah P1dB. Jika penguat didorong menuju titik kompresi, karena keterbatasan perilaku transistor, penguatan transistor akan mulai menunjukkan arus pinch-off (untuk FET) ketika tegangan gate-source sangat dekat ke kanal. Produk distorsi intermodulasi kuat muncul pada daerah ini. Keberadaan distorsi intermodulasi ini memerlukan metoda lain untuk mengarakterisasikan linearitas penguat.

Analisis Multinada

Output penguat daya dapat diungkapkan dalam deret Taylor hingga orde ketiga sebagai berikut.

$$v_o = k_1 v_i + k_2 v_i^2 + k_3 v_i^3 \quad (4)$$

Dalam analisis multinada, sinyal input terdiri dari sejumlah nada dengan amplitude konstan. Sinyal-sinyal tersebut dapat dinyatakan oleh

$$v_i = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \cos(\omega_n t) \quad (5)$$

Masukkan Persamaan (5) ke dalam Persamaan (4) dan kemudian, menggunakan manipulasi aljabar, diperoleh

$$\begin{aligned}
 v_o = & \sum_{n=1}^{\infty} \left[k_1 A_n + \frac{3}{4} k_3 A_n^3 + \frac{3}{2} k_3 \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} A_n A_m^2 \right] \cos \omega_n t \\
 & + \frac{1}{2} k_2 \sum_{n=1}^{\infty} A_n^2 [1 + \cos 2\omega_n t] \\
 & + \frac{1}{2} k_2 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} A_n A_m [\cos(\omega_n - \omega_m)t + \cos(\omega_n + \omega_m)t] \\
 & + \frac{1}{4} k_3 \sum_{n=1}^{\infty} A_n^3 \cos 3\omega_n t \\
 & + \frac{3}{4} k_3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} A_n A_m^2 [\cos(2\omega_m - \omega_n)t + \cos(2\omega_m + \omega_n)t] \\
 & + \frac{3}{2} k_3 \sum_{n=1}^{\infty} \sum_{\substack{m=1 \\ m \neq n}}^{\infty} \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq n \\ l \neq m}}^{\infty} A_n A_m A_l \begin{bmatrix} \cos(\omega_n - \omega_m - \omega_l)t \\ + \cos(\omega_n - \omega_m + \omega_l)t \\ + \cos(\omega_n + \omega_m - \omega_l)t \\ + \cos(\omega_n + \omega_m + \omega_l)t \end{bmatrix}
 \end{aligned}
 \tag{6}$$

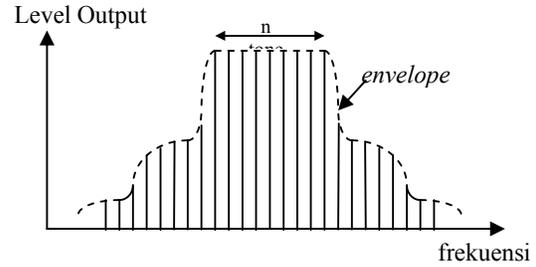
Baris pertama pada Persamaan (6) merupakan bagian linier dari respon keluaran sistem, dan terlihat bahwa semua frekuensi fundamental muncul. Baris kedua dan ketiga menunjukkan harmonik orde kedua. Pada bagian ini, terlihat bahwa terdapat $2n$ respon keluaran yang sebanding dengan $\cos(\omega_n - \omega_m)t$ dan $2n$ respon keluaran yang sebanding dengan $\cos(\omega_n + \omega_m)t$. Sementara itu, baris keempat sampai baris keenam menunjukkan harmonik orde ketiga. Di sini terlihat ada $2n$ respon keluaran sebanding dengan $\cos(2\omega_n - \omega_k)t$ dan $2n$ respon keluaran sebanding dengan $\cos(2\omega_n + \omega_k)t$. Selain itu, pada baris keenam, yang hanya muncul jika $n \geq 3$, ada $(n-2)^2$ respon keluaran yang sebanding dengan $\cos(\omega_n - \omega_m + \omega_k)t$, $\cos(\omega_n + \omega_m - \omega_k)t$, $\cos(\omega_n - \omega_m - \omega_k)t$, dan $\cos(\omega_n + \omega_m + \omega_k)t$. Respon-respon keluaran selain frekuensi fundamental muncul akibat campuran nonlinier dari n sinyal masukan, dan berkaitan dengan distorsi intermodulasi dari bentuk gelombang respon keluaran. Spektrum keluaran untuk n sinyal masukan pada sistem nonlinier ditunjukkan pada Gambar 2.

Besaran yang berkaitan dengan metoda multinada di antaranya adalah ACPR. ACPR, adalah perbandingan antara level daya kanal di sisi kanal utama dan level daya pada kanal utama. Secara matematis, ACPR, dalam dBc , dinyatakan oleh persamaan:

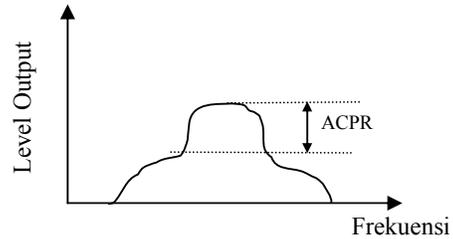
$$ACPR = 10 \log(P_1 + P_2) - 10 \log P_0
 \tag{7}$$

dengan P_0 adalah level daya pundamental, P_1 dan P_2 adalah level daya komponen harmonik terdekat ke fundamental, masing-masing untuk sebelah kiri dan

kanan. Ilustrasi grafis mengenai ACPR ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 2 Spektrum output penguat untuk n nada.

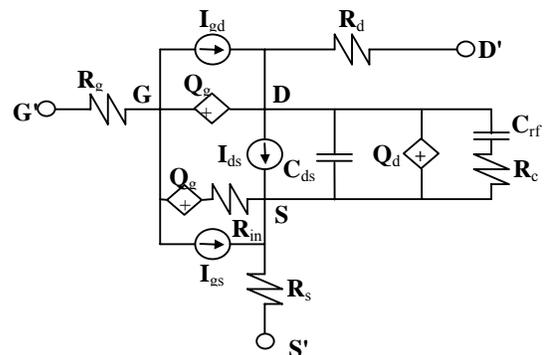


Gambar 3 Ilustrasi grafis ACPR.

HASIL DAN PEMBAHASAN

HFET SHF1086K digunakan sebagai devais aktif untuk menurunkan parameter model. Dalam kasus ini, model nonlinier FET Curtice-Ettenberg digunakan. Gambar 4 menunjukkan model sinyal besar FET berbasis model Curtice- Ettenberg.

Parameter model diturunkan melalui pengukuran DC dan AC. Selanjutnya, hasilnya disimulasikan menggunakan perangkat lunak LIBRA 2.0 dan Super Derriv 4.0.



Gambar 4 Model Sinyal besar GaAs FET.

(a)

(b)

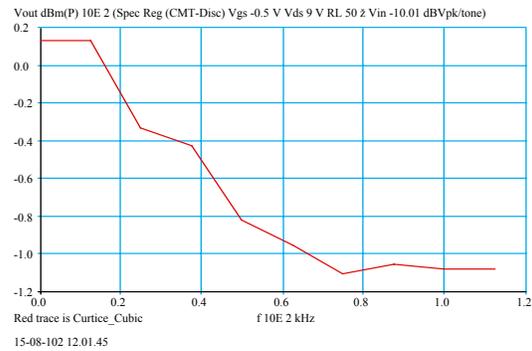
(c)

Gambar 5 Daya output power versus daya input penguat yang menunjukkan fundamental dan harmonic untuk: (a) $V_{gs} = -0.05$ V, (b) $V_{gs} = -0.10$ V, dan (c) $V_{gs} = 0.15$ V.

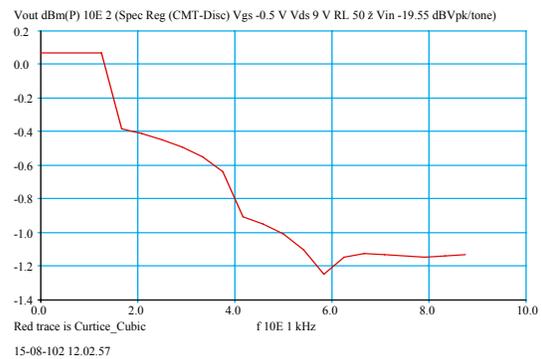
Gambar 5 menunjukkan output fundamental dan harmonic penguat untuk frekuensi 2,4 GHz dan tegangan gate-source -0.05 , -0.10 , and -0.15 V. Grafik ini menunjukkan bahwa tegangan bias gate-source mempengaruhi linearitas penguat daya.

Dalam penelitian ini digunakan daya inpu 0 dBm dan bandwidth 25 kHz. Frekuensi tengah 2.4 GHz. Hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar, 6, 7, 8, dan 9 masing-masing untuk dua, tiga, tujuh, dan sebelas nada. Grafik-grafik ini menunjukkan bahwa ACPR meningkat seiring meningkatnya jumlah nada.

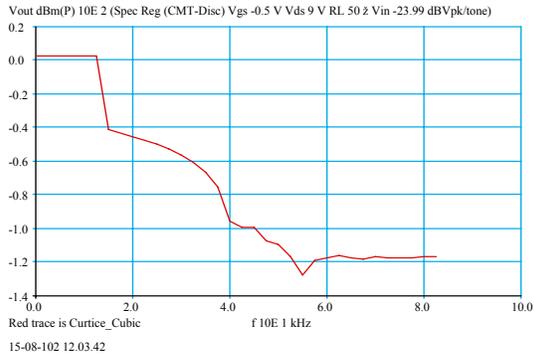
Gambar 6 Simulasi dua nada untuk daya input 0 dBm



Gambar 7 Simulasi tiga nada untuk daya input 0 dBm



Gambar 8 Simulasi tujuh nada untuk daya input 0 dBm.



Gambar 9 Simulasi sebelas nada untuk daya input 0 dBm.

SIMPULAN

Karakterisasi nonlinear perilaku penguat daya gelombang mikro GaAs HFET berbasis simulasi multinada telah selesai dilakukan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa semakin banyak jumlah nada yang dijadikan masukan, semakin rendah ACPR. Dengan demikian, analisis multinada dapat dijadikan alternative uji linearitas penguat daya sehingga diperoleh kineja penguat yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

Guoli Qu and A.E. Parker, "Analysis of Intermodulation Distortion in HEMT Common Source Amplifier", *Dept. of Electronics, Macquarie Univ.*, Sidney Australia.

J. A. Garcia, A. Mediavilla, J. C. Pedro, N. B. Carvalho, A. Tazón, and J. L. Garcia, "Characterizing the Gate-to-Source Nonlinear Capacitor Role on GaAs FET IMD Performance", in *IEEE Transaction on Microwave Theory and Tech.*, vol. 46, no. 12, pp. 2344-2355, Dec. 1998.

N.B. Carvalho and J.C. Pedro, "Multi-tone Intermodulation Distortion Performance of 3rd Order Microwave Circuits", *IEEE Int. Microwave Theory and Tech. Symp. Digest*, pp 763-766, Anaheim, June 1999.

R. Hajji and F. Bearegard, "Multitone Power and Intermodulation Load-Pull Characterization on Microwave Transistors Suitable for Linear SSPA's Design", *IEEE Transactions on Theory and Tech.*, Vol. 45, No. 7, July 1997.

S.A. Maas, "FET Models for Volterra Series Analysis", *Applied Wave Research Inc.*, 1999.

PENGENDALIAN KONVERTER DAYA YANG DILENGKAPI TAPIS LCL BERBASIS KONSEP RESISTOR DAN KAPASITOR VIRTUAL

Dadang Lukman Hakim¹

Ade Gafar Abdullah²

ABSTRAK : Galat arus pada sistem konverter DC-DC sering terjadi akibat perubahan kualitas sumber tegangan yang kurang baik dan perubahan beban, maka diperlukan suatu parameter untuk menghilangkan galat tersebut, salah satu parameternya adalah kapasitor tetapi hal tersebut berakibat terjadinya osilasi, untuk meredam osilasi tersebut diperlukan parameter lain yaitu sebuah resistor. Pada makalah ini, dipresentasikan suatu aplikasi konverter DC-DC yang dilengkapi tapis LCL yang berbasis resistor dan kapasitor virtual untuk menghilangkan galat keadaan tunak dan mendapatkan respon yang cepat. Mekanisme dan analisis konsep resistor dan kapasitor virtual diberikan secara detail, dan diberikan juga proses mendapatkan kompensator resistor dan kapasitor virtual menjadi kendali arus. Hasil eksperimen laboratorium membuktikan keabsahan dari aplikasi ini. Hasil pengujian menunjukkan bahwa saat transien terjadi overshoot relatif kecil sekitar 2% dan 6 ms osilasi yang terjadi sebelumnya dapat diredam.

ABSTRACT : Current error on DC-DC converter system often occurs because of the change of voltage quality and load, so a parameter is needed to reduce this error, such as a capacitor but it causes oscillation, another parameter, resistor, is needed to damp this oscillation. This paper represents an application of DC-DC converter that is completed by LCL filter based on virtual resistor and capacitor to reduce error steady state and to get faster response. Mechanism and concept analysis of virtual resistor and capacitor and also the process to get virtual resistor and capacitor compensator that becomes current control were given in detail. The result of laboratory experiment shows the validity of this application. The result of test shows that overshoot (about 2%) happens when transient and oscillation (about 6 ms) that happens before can be damped

KATA KUNCI : konverter DC-DC, tapis LCL, RC virtual.

PENDAHULUAN

Dalam beberapa aplikasi, seperti pada industri-industri elektrokimia, konverter DC-DC biasanya dioperasikan sebagai sumber arus searah dengan persyaratan riak yang sangat kecil [1-3]. Salah satu cara untuk memenuhi persyaratan ini adalah dengan menggunakan tapis orde tinggi, misalnya tapis LCL. Tapis LCL terbukti dapat mengurangi riak disisi keluaran suatu konverter [5]. Akan tetapi penggunaan tapis LCL tersebut membuat sistem beresilasi dan mengakibatkan respon yang lambat [4]

Pengendalian penyearah fasa terkendali penuh yang dilengkapi tapis LCL telah diusulkan [4]. Metoda kendali yang digunakan berbasis state feedback dan tracking system dengan menggunakan suatu observer. Namun kelemahan konsep ini adalah sensitif terhadap parameter.

Pada makalah ini dikembangkan metoda pengendalian konverter daya yang dilengkapi tapis LCL berbasis konsep resistor dan kapasitor virtual dan diharapkan dapat meredam osilasi, dan menghasilkan respon yang cepat serta relatif tidak sensitif terhadap parameter.

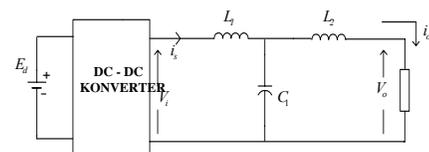
TINJAUAN PUSTAKA

Konverter Dc-Dc

Konverter DC-DC yang dilengkapi tapis LCL dengan sistem kendali *open loop* diperlihatkan gb. 1a. sedangkan gb.1b adalah diagram bloknya, pada diagram blok Gb. 1b, G_F menyatakan *feed forward gain*. *Pengendali yang baik mempunyai sifat-sifat berikut:*

- Galat keadaan tunak sama dengan nol pada bermacam-macam kondisi.
- Mempunyai respon cepat.
- Responnya tidak beresilasi.

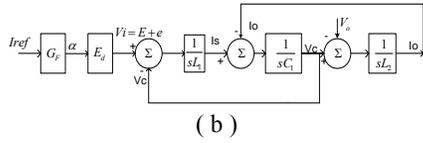
Tanpa adanya umpan balik, pengendali *open loop* tidak mungkin mempunyai galat keadaan tunak sama dengan nol. Adanya tapis LCL menyebabkan respon sistem beresilasi dan cenderung lambat.



(a)

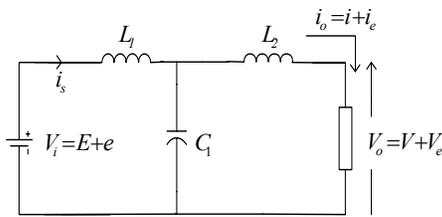
¹ Dadang Lukman Hakim adalah dosen pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro UPI

² Ade Gafar Abdullah adalah dosen pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro UPI

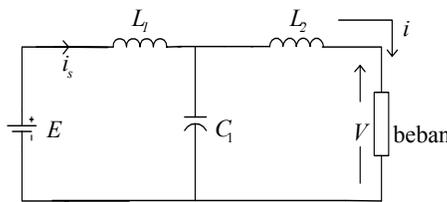


Gambar.1. Konverter DC-DC dengan sistem kendali *open loop*

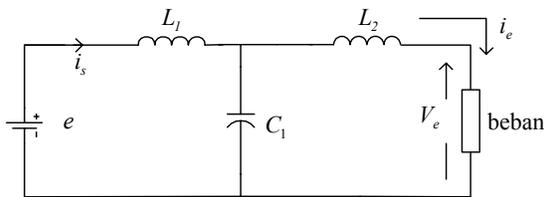
Rangkaian ekivalen konverter DC-DC diperlihatkan pada gambar 2. Tegangan konverter dibagi atas tegangan yang diinginkan E dan tegangan penghasil *error* e untuk memudahkan analisisnya tegangan yang diinginkan (E) dan tegangan *error* dipisahkan.



(a)



(b)



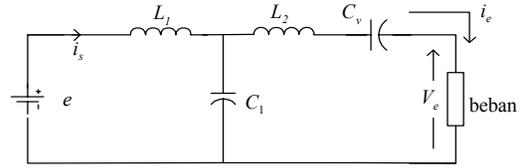
(c)

Gambar.2 Rangkaian ekivalen DC-DC konverter dengan tapis LCL

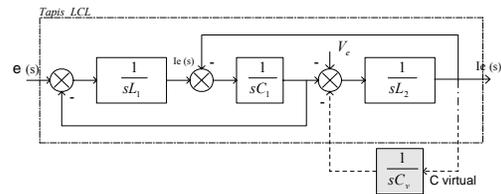
Penggunaan Kapasitor Virtual

Langkah pertama C virtual ditempatkan di sisi *error* seperti terlihat pada gambar 3a, selanjutnya C virtual ditarik ke sisi suplai seperti diperlihatkan

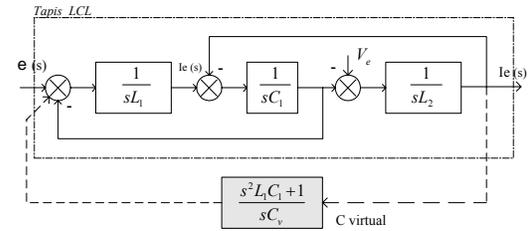
gambar 3b, 3c, dan menjadi kendali baru bagi sistem seperti gambar 3d.



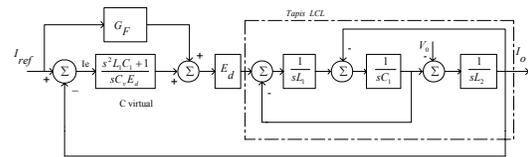
(a)



(b)



(c)

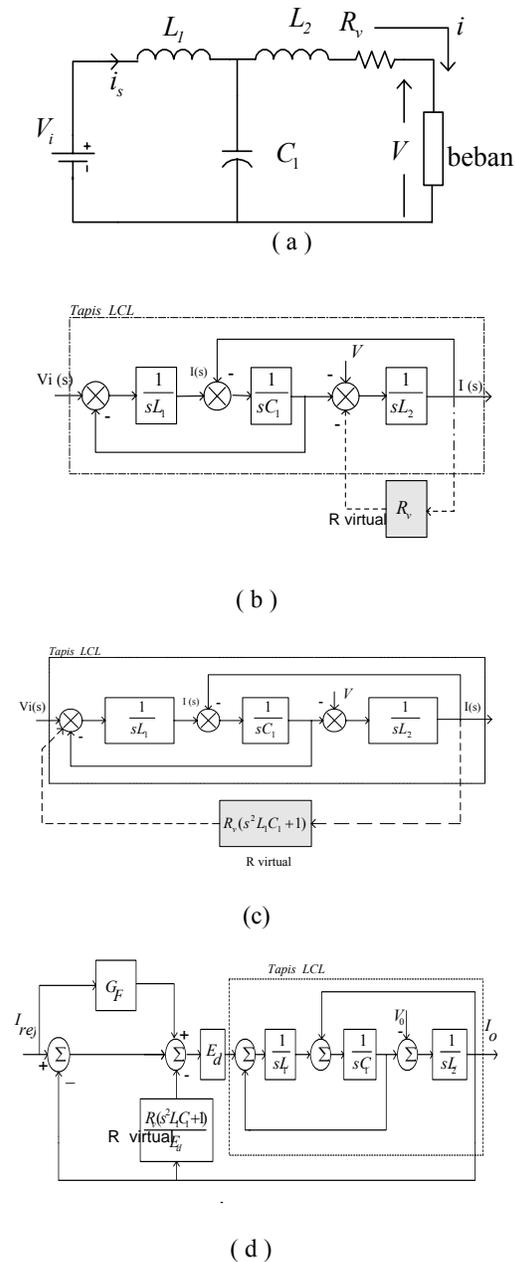


(d)

Gambar. 3. Konverter DC-DC berbasis C virtual di sisi beban

Penggunaan Resistor Virtual

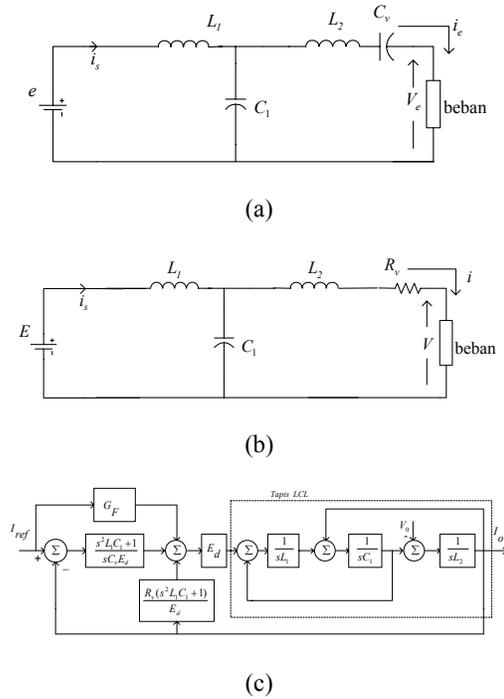
Resistor yang berfungsi meredam osilasi dipasang di sisi beban seperti terlihat pada gb. 4a., selanjutnya dibuat diagram bloknya seperti terlihat pada gb.4b., R tersebut kita geser posisinya ke sisi sumber dengan menggunakan metoda aljabar blok seperti gb. 4c. Akhirnya rangkaian tersebut berubah seperti terlihat seperti gb.4d



Gambar 4. Konverter DC-DC berbasis R virtual di sisi beban

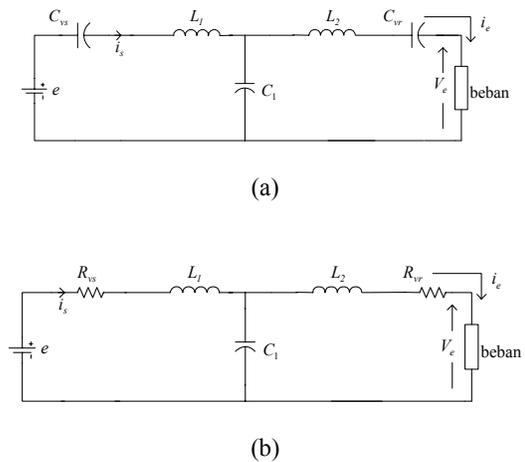
Posisi Resistor dan Kapasitor Virtual

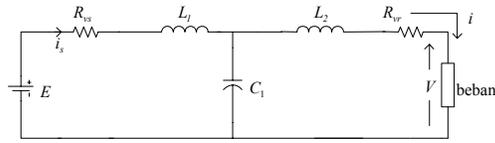
Penempatan C hanya bisa di posisi error, sedangkan R diusulkan diposisi tegangan yang diharapkan, saat penggabungan tegangan yang diharapkan dengan tegangan penghasil error, posisi C menjadi virtual begitupun dengan R menjadi virtual supaya resistor tersebut tidak menjadi beban bagi system.



Gambar 5. Konverter DC-DC berbasis RC virtual di sisi beban

Beberapa posisi yang dapat diusulkan dalam metoda ini diantaranya menempatkan C virtual pada sisi beban dan atau di sisi keluaran konverter dengan posisi di error seperti terlihat pada gb.6a. Sedangkan R virtual dapat ditempatkan di error maupun di aktual dengan posisi di sisi beban maupun di sisi keluaran konverter, seperti terlihat pada gb.6b dan 6c.





(c)

Gambar 6. Konverter DC-DC berbasis RC virtual di sisi beban dan di sisi keluaran konverter.

Penggunaan RC virtual bisa dalam beberapa konfigurasi seperti gb.6, tetapi minimal satu resistor virtual dan satu kapasitor virtual.

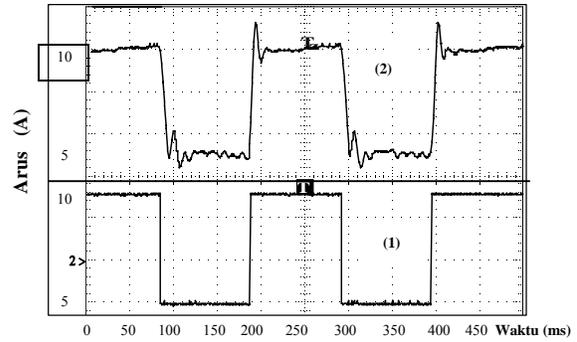
HASIL PERCOBAAN

Dalam melakukan percobaan metoda yang diusulkan adalah dengan menempatkan C virtual pada sisi error, sedangkan R virtual di sisi aktual dengan sensor arus di sisi beban. Pengendalian konverter daya yang dilengkapi tapis LCL berbasis konsep resistor dan kapasitor virtual dirancang untuk tegangan rating sebesar 100 volt dan arus rating sebesar 10 A. Pengambilan data dilakukan dengan menggunakan osiloskop digital Tektronix TDS 220 yang memiliki *bandwidth* hingga 100 MHz dengan *software* WaveStar Lite Version 1.0.10. Parameter sistem yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Tegangan masukan $V_d = 100\text{ V}$
- Filter LCL : $L_1 = 32\text{ mH}$; $L_2 = 8\text{ mH}$;
- $C_1 = 1000\text{ uF}$
- Beban : $R_b = 7\text{ Ohm}$.

Sistem Pengendali Arus Dengan Kompensator C Virtual dan Umpan Maju

Dari hasil pengukuran dengan arus acuan yang berubah sinyal persegi, arus keluaran telah mengikuti arus acuan seperti diperlihatkan pada gambar 7, tetapi saat transien terjadi overshoot sekitar 15% dan arus keluaran mengalami osilasi saat sinyal keluaran bergerak turun dari 10A ke 5A. Pada kondisi keadaan tunak, sudah mengikuti sinyal acuan tetapi masih ada galat seperti terlihat pada gb. 7.



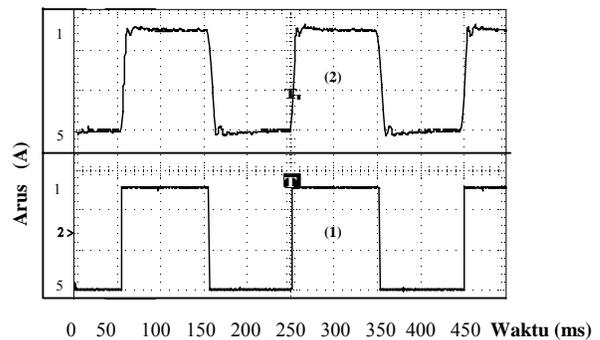
(1) : Arus referensi (2) : Arus keluaran

Gambar 7. Arus keluaran konverter DC-DC terhadap masukan sinyal persegi pada $f = 5\text{ Hz}$, tanpa resistor virtual..

Dari hasil percobaan terlihat bahwa pengendali arus dengan kompensator C virtual seperti ditunjukkan gambar 7. telah membuktikan bahwa kompensator C virtual mampu bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

Sistem Pengendali Arus Dengan Kompensator C & R Virtual dan Umpan Maju

Dari hasil pengukuran dengan arus acuan yang berubah baik sinyal persegi maupun sinyal sinusoidal, arus keluaran telah mengikuti arus acuan seperti diperlihatkan pada gambar 8, saat transien terjadi overshoot relatif kecil sekitar 2% dan 6 ms osilasi yang terjadi sebelumnya dapat diredam.



(1) : Arus referensi (2) : Arus keluaran

Gambar 8. Arus keluaran konverter DC-DC terhadap masukan sinyal persegi pada $f = 5\text{ Hz}$, dengan resistor virtual.

Dari hasil percobaan terlihat bahwa pengendali arus dengan kompensator C dan R virtual seperti ditunjukkan gambar 8, telah membuktikan bahwa kompensator C dan R virtual mampu bekerja sesuai dengan yang diharapkan.

KESIMPULAN

Dari hasil analisis dan percobaan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan terhadap pengendalian konverter daya berbasis konsep resistor dan kapasitor virtual sebagai berikut:

- a. Kapasitor virtual dapat menghilangkan galat keadaan tunak.
- b. Resistor virtual dapat meredam osilasi.
- c. Implementasi resistor dan kapasitor virtual sangat ditentukan oleh lokasi pemasangannya.
- d. Hasil percobaan telah memperlihatkan validitas.

SARAN – SARAN

- a. Perlu diteliti lebih lanjut, penggunaan konsep Resistor dan Kapasitor virtual untuk penggunaan lainnya.
- b. Perlu juga diteliti lebih lanjut, pengaruh perubahan parameter tapis pada kinerja pengendali.

DAFTAR PUSTAKA

- B. Halimi and P.A.Dahon.2001, *A Current Control Method for Phase-Controlled Rectifier That Has An LCL Filter*, IEEE PEDS, -INDONESIA
- G. Zhang and J. Furusho, June 2000, *Speed Control of Two-Inertia System by PI/PID Control*, IEEE Trans. Ind. Electron, vol. 47, No.3.
- Ogata, Katsuhiko, 1996. *Modern Control Engineering*, Prenticce-Hall,.
- P.A. Dahono and R. Mulyadi, 2001. *A New Method of DC-DC Converters Based on Virtual Capacitance Concept*, IEEE PEDS, - INDONESIA.
- S.B Kjaer, G.K. Anderson, and C. Klumpner ,August 2002, *Control Aspects of a LCL Grid-Connected Green Power Inverter*, NORPIEI 2002, Nordic Workshop on Power Electronics, 12-14 .

PERBANDINGAN KERJA SISTEM MULTI POINT INJECTION DENGAN SISTEM KARBURATOR

Jaja Kustija¹

ABSTRAK: Kemajuan teknologi pada bidang elektronik pada saat sekarang membuat orang berusaha untuk membuat kinerja sistem yang lama akan menjadi lebih baik dengan memanfaatkan teknologi elektronik tersebut, salah satu penerapan bidang elektronik tersebut adalah sistem Multi Point Injection pada bidang otomotif yang menggantikan sistem konvensional yaitu karburator, dimana sistem Multi Point Injection akan menghasilkan kinerja engine lebih baik dari pada sistem Karburator. Multi Point Injection adalah sistem penginjeksian bahan bakar (supply bahan bakar) ke dalam ruang bakar engine yang dikontrol secara elektronik berdasarkan sinyal-sinyal sensor sehingga engine akan mendapatkan supply campuran udara dan bahan bakar yang sesuai dengan kondisi engine pada saat itu, dimana sistem ini pada saat sekarang sudah banyak dipergunakan oleh produsen kendaraan khususnya mobil untuk menggantikan sistem yang konvensional yaitu karburator, pada sistem karburator (konvensional) supply campuran udara dan bahan bakar ke dalam engine dilakukan secara mekanikal yaitu hanya berdasarkan tingkat kevakuman engine sehingga keakuratan dalam supply campuran udara dan bahan bakar pada tiap kondisi kendaraan kurang akurat. Dengan adanya sistem Multi Point Injection (MPI) yang menerapkan bidang elektronik pada bidang otomotif maka akan dihasilkan pembakaran yang sempurna pada engine karena engine akan di berikan campuran udara dan bahan bakar yang tepat sesuai dengan kondisi engine pada saat itu sehingga dengan sistem Multi point Injection akan didapatkan engine performa yang tinggi, emisi gas buang yang lebih baik serta pemakaian bahan bakar yang ekonomis dari pada sistem Karburator (konvensional).

ABSTRACT: The Improvement of electronic technology in recent day make people want to improve their old system become better, the example is Multi Point Injection system are replacing the carburetor system function at automotive, which Multi Point Injection system can produce engine performance is better than carburetor. Multi Point Injection is fuel injection system to engine combustion chamber with electronics control base on information from sensors signals, so the engine supplied appropriate air fuel ratio at actual condition, most vehicle maker especially car maker at recent day use this system for replacing conventional system (carburetor), the conventional system (carburetor) is mechanically air fuel ratio supply to engine, the air fuel ratio supply is only base on vacuum level so the air fuel ratio is not accurate with the condition of engine. With electronics Multi Point Injection system in automotive can make perfect combustion to the engine because engine is supplied appropriate air fuel ratio with the condition of engine, with Multi Point Injection system the engine power, fuel consumption and emission are better than carburetor (conventional).

Kata Kunci : Multi Point Injection, Karburator, Electronic Fuel Injection

TUJUAN

Menganalisa antara sistem Multi Point Injection (MPI) dan sistem karburator dalam supply bahan bakar dengan membandingkan tenaga engine yang dihasilkan (engine performa), pemakaian bahan bakar (fuel consumption) dan hasil emisi gas buangnya.

LATAR BELAKANG

Salah satu penerapan bidang elektronik dalam dunia automotive adalah sistem pengontrolan injeksi bahan bakar (gasoline) kedalam silinder engine, dimana sistem ini menggantikan sistem karburator yang bekerja secara mekanikal (konvensional) dimana sistem supply bahan bakar secara elektronik lebih baik dibandingkan dengan sistem karburator (mekanikal) dalam segi engine performa, emisi gas buang dan konsumsi bahan bakar, dalam kendaran Mitsubishi

sistem pengontrolan injeksi bahan bakar secara elektronik dikenal dengan Multi Point Injection (MPI), pada merk Toyota dikenal dengan Electronic Fuel Injection (EFI) dll. yang mana sistem injeksi bahan bakar ini pada dasarnya adalah sama.

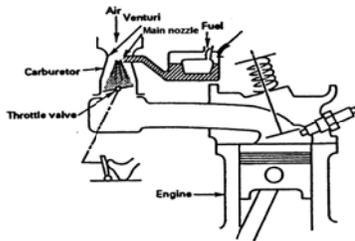
LANDASAN TEORI

Prinsip Kerja Karburator

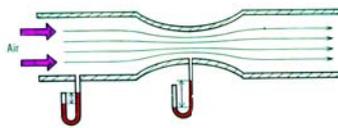
Karburator adalah komponen pensupply campuran udara dan bahan bakar yang bekerja berdasarkan adanya negative pressure (vacum) yang dihasilkan oleh hisapan piston pada engine saat langkah intake dan dorongan aliran udara dari luar (positive pressure) yang membuat aliran udara pada venturi karburator menghisap bahan bakar dari float chamber masuk ke dalam intake manifold, lalu masuk keruang bakar silinder yang digunakan untuk

¹ Jaja Kustija adalah dosen pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro UPI

menghasilkan expansion (pembakaran) dengan dipercikannya bunga api melalui busi, sehingga dihasilkanlah putaran engine yang diteruskan ke transmisi, ke differential lalu ke roda.

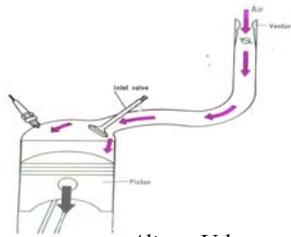


Karburator



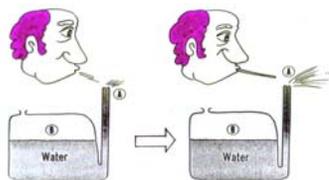
Venturi

Venturi adalah saluran aliran udara yang dipersempit dimana pada daerah venturi tersebut dihasilkan kevakuman yang tinggi karena aliran udara yang masuk (positive dan negative pressure) tercepat berada pada bagian venturi tersebut sehingga fuel dapat terhisap dari float chamber.

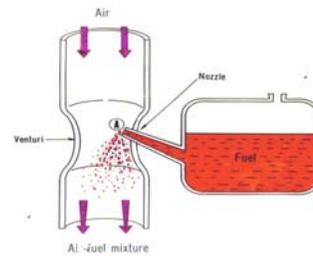


Aliran Udara

Gerakan kebawah piston menciptakan negative pressure atau kevakuman didalam silinder dan tekanan atmosfer yang lebih tinggi mendorong udara melalui karburator (positive pressure) ke intake manifold kemudian ke dalam silinder.



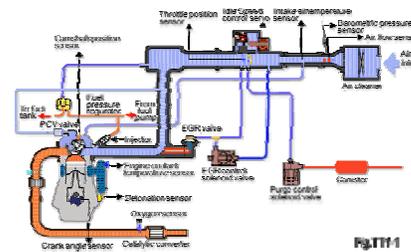
Kecepatan udara yang lebih besar menghasilkan negative pressure yang lebih rendah, sehingga fluida akan terhisap lebih banyak



Prinsip kerja karburator menggunakan venturi untuk meningkatkan kecepatan aliran udara, sebuah pipa kapiler yang menghubungkan bahan bakar cair tersebut pada venturi untuk menarik bahan bakar tersebut dari float chamber.

Prinsip Kerja Multi Point Injection

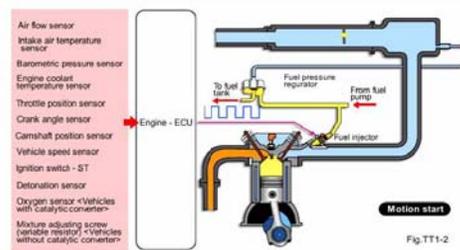
Multi point injection adalah sistem supply campuran udara dan bahan bakar kedalam engine yang dikontrol secara elektronik agar didapatkan nilai campuran udara dan bahan bakar selalu sesuai dengan kebutuhan engine, sehingga dengan sistem MPI didapatkan engine performa yang tinggi, pemakaian bahan bakar yang ekonomis serta menghasilkan emisi gas buang yang ramah lingkungan. Sistem MPI terdiri dari Fuel Supply System, Ignition Control System, Idle Speed Control System dan Emission Control System.



Multi Point Injection

Fuel Supply System

Mengontrol fuel injector memberikan air-fuel ratio yang terbaik dari kondisi operasi engine yang berubah-ubah untuk menghasilkan keseimbangan yang paling baik antara power engine, fuel consumption dan emisi exhaust yang rendah (pembakaran yang sempurna).

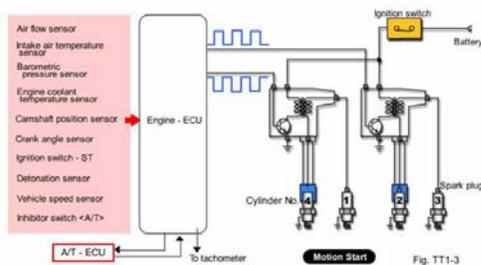


Fuel Supply System

- ✓ Air flow sensor
Jika jumlah udara yang masuk banyak maka jumlah injeksinya diperbanyak.
- ✓ Intake air temperature sensor
Jika temperature udara yang masuk rendah maka jumlah injeksi diperbanyak, karena udara dingin jumlahnya lebih banyak dan padat dari pada udara panas.
- ✓ Barometric pressure sensor
Jika di dataran tinggi maka jumlah injeksi di kurangi, karena didataran tinggi jumlah udara sedikit.
- ✓ Engine coolant temperature sensor
Jika temperature engine masih dingin maka jumlah injeksi diperbanyak, karena jika suhu engine dingin bahan bakar sulit menguap dan bercampur dengan udara.
- ✓ Throttle position sensor
Jika pembukaan throttle besar maka jumlah injeksi di perbanyak, karena jumlah udara yang masuk banyak.
- ✓ Crank angle sensor
Makin cepat putaran engine maka makin banyak jumlah injeksinya.
- ✓ Camshaft position sensor
Injektor akan menginjeksi ke silinder pada langkah intake berdasarkan sinyal ini.
- ✓ Vehicle speed sensor
Saat beban engine besar (tanjakan) maka injeksi akan diperbanyak.
- ✓ Ignition switch ST
Saat start engine jumlah injeksi diperbanyak.
- ✓ Detonation sensor
Jika terjadi knocking maka jumlah injeksi di kurangi.
- ✓ Oxygen sensor
Jumlah injeksi di atur untuk mendapatkan air fuel ratio 15 : 1 dengan sinyal ini.
- ✓ Mixture adjusting screw
Mengatur secara manual air fuel ratio yang dikehendaki (tanpa oxygen sensor).

Ignition Control System

Menghasilkan pengapian (percikan bunga api) yang kuat dan tepat untuk menghasilkan pembakaran.

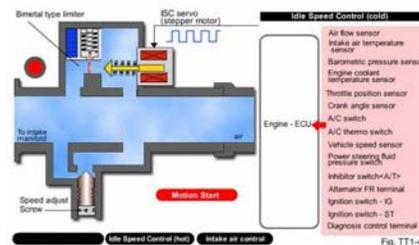


Ignition Control System

- ✓ Air flow sensor
Jika udara yang masuk banyak maka ignition timing dimundurkan.
- ✓ Air temperature sensor
Jika temperatur udara yang masuk rendah maka timing dimundurkan.
- ✓ Barometric pressure sensor
Jika didataran tinggi maka timing dimajukan karena campuran udara dan bahan bakar sedikit (bahan bakar sulit terbakar).
- ✓ Engine coolant temperature sensor
Jika suhu engine dingin maka timing dimundurkan.
- ✓ Camshaft position sensor
Jika terjadi sequential injection maka timing dimundurkan.
- ✓ Crank angle sensor
Makin cepat putaran engine maka timing dimajukan.
- ✓ Ignition switch ST
Saat start engine timing dimundurkan.
- ✓ Detonation sensor
Saat terjadi knocking maka timing dimundurkan sesaat lalu perlahan dimajukan.
- ✓ Vehicle speed sensor
Saat beban engine bertambah maka timing dimundurkan.
- ✓ Inhibitor switch
Ignition tidak akan terjadi pada saat start engine jika change lever pada posisi selain P (parking) atau N (Neutral) pada kendaraan automatic transmission.

Idle Speed Control System

Idle speed control system mengatur banyaknya aliran udara yang mengalir melalui intake ketika throttle valve tertutup (idling). Sistem ini memonitor rpm engine pada saat idling.



Idle Speed Control System

- ✓ Air flow sensor
ISC servo akan lebih menutup jika jumlah udara yang masuk terlalu banyak.
- ✓ Intake air temperature sensor
Jika suhu udara yang masuk rendah maka ISC servo lebih menutup.
- ✓ Barometric pressure sensor
Jika didataran tinggi ISC servo lebih membuka karena jumlah udara sedikit.
- ✓ Engine coolant temperature sensor

Jika suhu engine tinggi maka ISC servo lebih membuka.

- ✓ Throttle position sensor dan vehicle speed sensor
Jika throttle valve full open maka ISC servo terbuka penuh untuk persiapan saat deselerasi dimana ISC servo menutup perlahan agar tidak terjadi engine brake.

- ✓ Crank angle sensor
Saat idling jika rpm engine tinggi maka ISC servo lebih menutup.

- ✓ AC switch, thermo switch, power steering fluid pressure switch, alternator FR terminal

Jika terjadi pembebanan pada engine saat idling maka ISC servo membuka untuk menaikkan rpm engine.

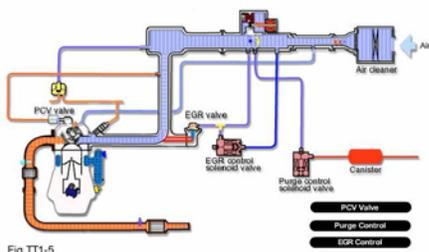
- ✓ Inhibitor switch dan ignition switch ST
Saat start engine pada pada posisi P atau N maka ISC servo membuka penuh.

- ✓ Ignition switch IG
Saat ignition switch IG dan idle ISC servo menyesuaikan pembukaannya berdasarkan rpm engine.

- ✓ Diagnosis control terminal
Saat diagnosis control terminal di ground-kan maka ISC servo di set pada 9 step ini untuk menyetel ISC servo dan SAS terhadap rpm engine.

Emission Control System

Sistem kontrol emisi berfungsi mengontrol Hydrocarbon (HC), Carbon Monoxide (CO), dan Oxides Of Nitrogen (NOx) yang dihasilkan oleh exhaust gas hasil pembakaran.



Emission Control System

- ✓ PCV valve
Menyalurkan blow by gas dari crank case berdasarkan kevakuman engine.

- ✓ Purge control
Mengalirkan uap bahan bakar ke intake manifold saat suhu engine pada temperature kerja dan throttle valve terbuka.

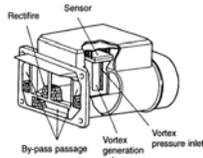
- ✓ EGR control
Mengalirkan sedikit exhaust gas ke ruang bakar untuk mengurangi Nox saat suhu engine pada temperatur kerjanya dan kevakuman di intake manifold tinggi.

Sensor

Sensor-sensor yang digunakan dalam sistem Multi Point Injection antara lain :

Air Flow Sensor

Untuk mengukur jumlah udara yang masuk kedalam engine dengan merubah jumlah udara yang masuk menjadi sinyal pulsa (frekuensi) ke ECU.



Air Flow Sensor

Intake Air Temperature Sensor

Mensensor suhu udara yang masuk kedalam engine dengan menggunakan thermistor jenis NTC, merubah suhu udara masuk menjadi nilai tahanan.



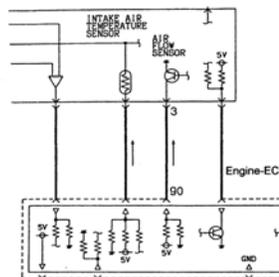
Intake Air Temperature Sensor

Barometric Sensor

Untuk mengukur tekanan udara yang dikarenakan ketinggian suatu tempat dengan merubah tekanan udara menjadi nilai tegangan.



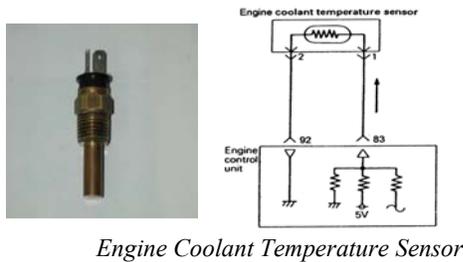
Barometric Sensor



Rangkaian Air flow, Intake air temperature & Barometric Sensor

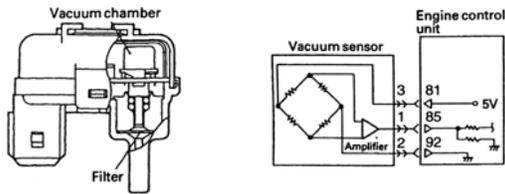
Engine Coolant Temperature Sensor

Untuk mengukur suhu engine coolant dengan merubah suhu coolant menjadi nilai tahanan.



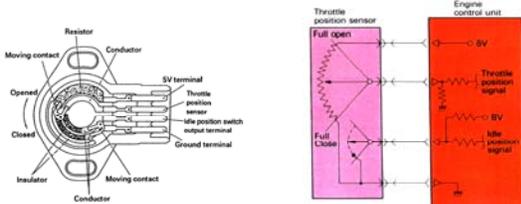
Engine Coolant Temperature Sensor

Vacuum Sensor / Manifold Absolute Pressure
Mengukur tingkat kevakuman di intake manifold engine dengan merubahnya menjadi nilai tegangan.



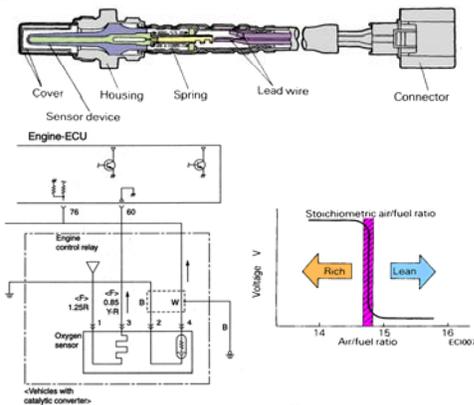
Vacuum Sensor / Manifold Absolute Pressure

Throttle Position Sensor dengan Idle Switch Position Sensor
Mengukur derajat pembukaan throttle valve dan untuk mengetahui engine dalam keadaan idle sesuai tingkat perubahan nilai tahanannya.



Throttle Position Sensor dengan Idle Switch Position Sensor

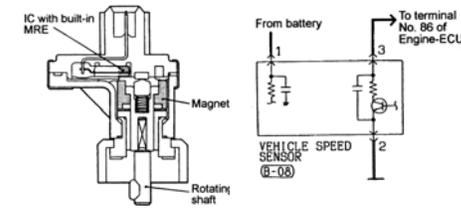
Oxygen Sensor
Mengukur kadar oksigen dalam exhaust gas sesuai perubahan nilai tegangannya.



Oxygen Sensor

Vehicle Speed Sensor

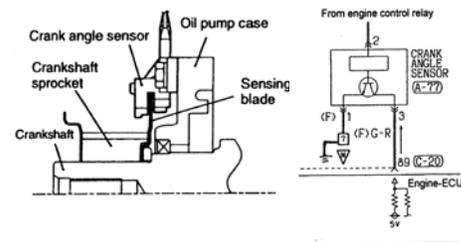
Mengukur laju kecepatan kendaraan dengan perubahan nilai pulsanya.



Vehicle Speed Sensor.

Crank Angle Sensor

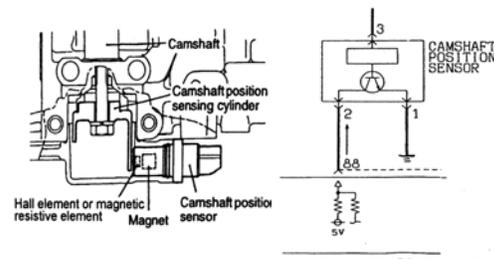
Mengetahui sudut putaran crankshaft berdasarkan bentuk pulsa yang dihasilkan.



Crank Angle Sensor

Camshaft Position Sensor / Top Death Center

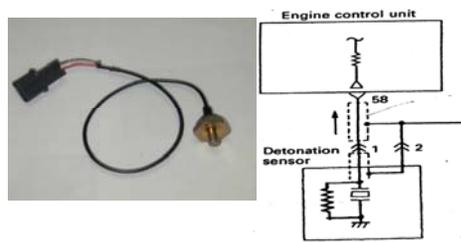
Untuk mengetahui top kompresi silinder no. 1 berdasarkan bentuk pulsa yang dihasilkan.



Camshaft Position Sensor / Top Death Center

Detonation Sensor / Knock Sensor

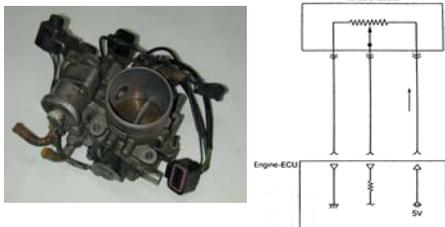
Untuk mengetahui engine knocking dengan merubah getarannya menjadi nilai tegangan.



Detonation Sensor / Knock Sensor

Variable Resistor

Untuk merubah secara manual campuran udara dan bahan bakar dengan merubah nilai tahanannya.



Variable Resistor

AC Switch

Untuk mengetahui AC sedang bekerja atau tidak berdasarkan sinyal ON atau OFF switch.

AC S/W

DUAL P S/W

THERMOSTATE

COOLANT S

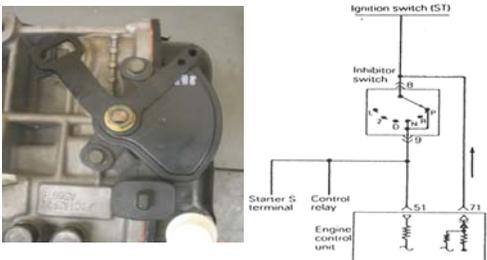
COMP.

ECU

AC Switch

Ignition Switch & Inhibitor Switch (A/T)

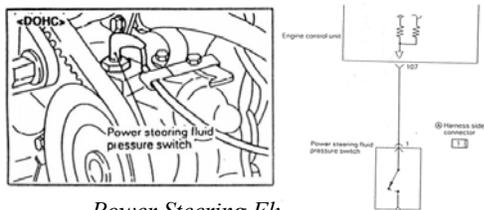
Untuk mengetahui posisi selector automatic transmission yang dipilih.



Ignition Switch & Inhibitor Switch (A/T)

Power Steering Fluid Pressure Switch

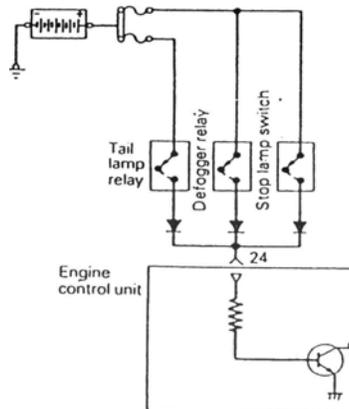
Untuk mengetahui apakah power steering sedang bekerja atau tidak berdasarkan sinyal ON atau OFF switch.



Power Steering Flh

Electrical Load Switch

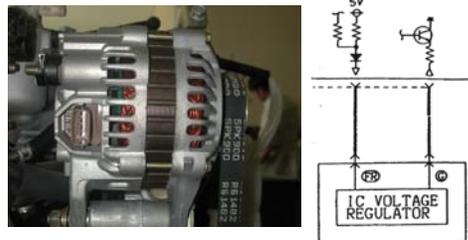
Untuk mengetahui apakah ada beban electrical yang sedang hidup pada engine berdasarkan sinyal ON atau OFF switch.



Electrical Load Switch

Alternator FR Signal

Untuk mendeteksi waktu kerja (duty ratio) dari field coil alternator di karenakan adanya beban electrical pada engine.



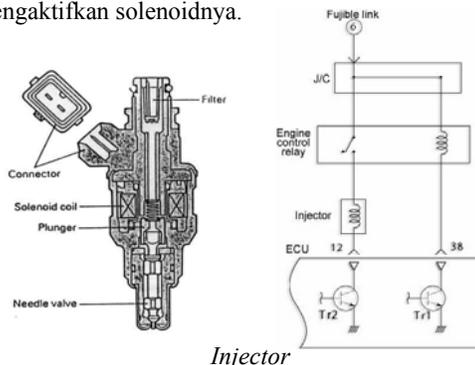
Alternator FR Signal

Aktuator

Aktuator adalah komponen yang bekerja berdasarkan perintah ECU.

Injector

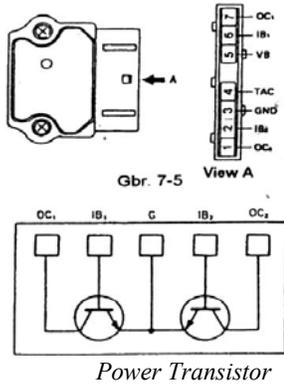
Injector adalah komponen yang menyemprotkan atau menginjeksikan fuel yang bertekanan dari delivery pipe ke intake manifold sesuai dengan perintah ECU dengan mengaktifkan solenoidnya.



Injector

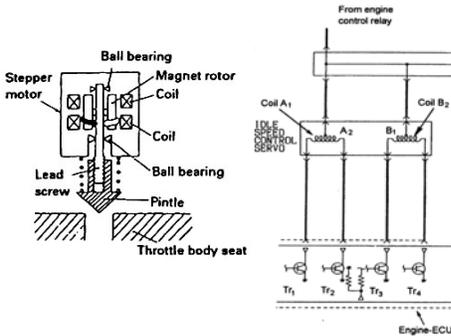
Power Transistor

Power transistor untuk memutuskan arus primary coil setelah tercapai 6A sehingga di primary coil akan terjadi self induksi dan menginduksi secondary coil sehingga di secondary coil akan timbul tegangan tinggi (30.000V).



ISC Stepper Motor

Komponen yang mengatur udara yang masuk kedalam engine yang dikontrol oleh ECU dengan mengaktifkan stepper motor.



METODE PENELITIAN

Pengambilan data yang dilakukan pada kendaraan Mitsubishi Kuda dan Mitsubishi T120ss ini untuk mendapatkan hasil tentang engine performa, emisi dan fuel consumption-nya sehingga didapatkan suatu data perbandingan antara sistem MPI dan sistem karburator.

Engine Performa

Pengukuran engine performa untuk mendapatkan power output dan torque output dari suatu engine. Pengukuran dilakukan dengan menggunakan Chassis dynamometer "MAHA MASCHINENBAU PERFORMANCE TESTER LPS 2000".



Roller set

Chassis dynamometer

Fuel Consumption

Menghitung fuel consumption dengan menggunakan fuel pad "Onosokki TF 501" dan metode full to full.

Fuel Pad "Onosokki TF 501"

Menghitung fuel consumption dengan memasang fuel pad di kendaraan dan berjalan dengan rute seperti dengan metode full to full.



Digital counter / flow detector



Flow Sensor for Gasoline Engine

Full To Full

Menghitung pemakaian bahan bakar di bagi jarak tempuhnya. Contoh rute dalam pengujian :

Jakarta Timur – Tol TMII – Tol Ciawi – Puncak Pass – Cianjur – Sukabumi – Tol Ciawi – Tol TMII – Jakarta Timur dengan jarak ± 253 KM.

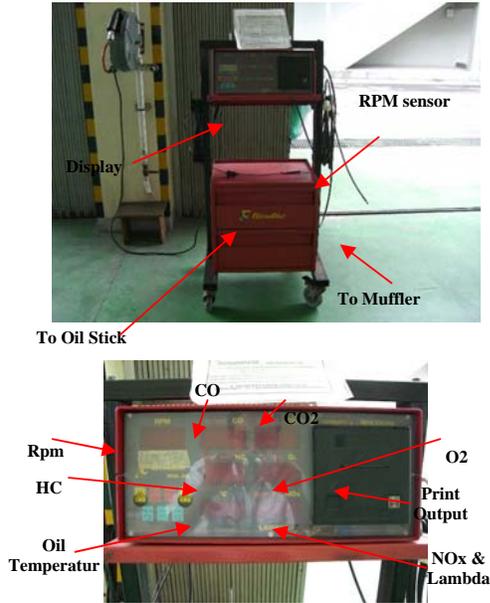
Jakarta Timur – Tol Cempaka – Tol Ciawi – Cianjur – Jonggol – Cileungsi – Tol Cibubur – Tol Rawa Mangun dengan jarak ± 319 KM.

Jakarta Timur – Tol Rawa Mangun – Tol Karawaci – Serpong- Cicangkal – Bunar – Leuwiliang – Rumpin –

Parung – Tol Bogor – Tol Rawa Mangun – Jakarta Timur dengan jarak ± 227 KM.

Emissi

Mengukur tingkat kadar hasil emisi yang dikeluarkan kendaraan dengan menggunakan “TECNOTEST TYPE 488 CUNA NC 005/05 N. 3664/4103/8 – 1 CERTIFICATION OIML I N. 293/ETL91215”



TECNOTEST TYPE 488 CUNA NC 005/05 N. 3664/4103/8 – 1 CERTIFICATION OIML I N. 293/ETL91215

ANALISIS DAN PEMBAHASAN

Setelah melakukan pengukuran didapatkan hasil.

Engine Performa

Item	Kendaraan	
	Kuda Karburator	Kuda MPI
Type Engine	4G18S3	4G63S4
Bore x Stroke (mm x mm)	76 x 87,3	85 x 88
Displacement (cc)	1584	1997
Max. Output (Ps/rpm)	90 / 5500	114 / 5500
Max. Torque (Kgm/rpm)	13,6 / 4000	16,3 / 3000

Mitsubishi Kuda (Karburator 1999MY, MPI 2002MY)

Item	Kendaraan	
	T120ss Karburator	T120ss MPI (Euro)
Type Engine	4G17	4G15
Bore x Stroke (mm x mm)	72,2 x 82,0	75,5 x 82,0
Displacement (cc)	1343	1468
Max. Output (Ps/rpm)	78 / 6000	82,5 / 5750
Max. Torque (Kgm/rpm)	10,9 / 3500	12,1 / 3750

Mitsubishi T120ss (Karburator 1991MY, MPI Euro2 2007MY)

Tenaga engine yang dihasilkan oleh sistem MPI lebih besar dari pada sistem karburator.

Fuel Consumption

	Kuda		T120ss	
	Karb.	MPI	Karb.	MPI
Fuel Pet (KM/L)	7,54	8,03	10,85	12,12
Full to Full (KM/L)	7,40	7,50	10,51	10,68

Walaupun Mitsubishi Kuda dan T120ss MPI menggunakan total displacement yang lebih besar dari pada Mitsubishi Kuda dan T120ss Karburator tetapi pemakaian bahan bakarnya lebih ekonomis.

Emissi

	RPM	Exhaust Emission					
		CO	CO2	HC	O2	NOx	Lambda
Kuda Karb.	850	5,69	10,3	206	0,30	53	0,841
Kuda MPI	750	0,96	14,0	119	0,47	361	0,989
Kuda Karb.		3,37	12,0	95	0,16	122	0,904
Kuda MPI	3000	0,84	14,4	126	0,47	463	0,990

Mitsubishi Kuda MPI VS Kuda Karburator

	RPM	Exhaust Emission					
		CO	CO2	HC	O2	NOx	Lambda
T120ss Karb.	750	2,04	11,1	686	3,97		1,102
T120ss MPI		0,00	14,9	0,008	0,18	0,004	1,007
T120ss Karb.	2500	2,33	10,8	165	3,97		1,117
T120ss MPI		0,00	15,0	0,000	0,00	0,004	1,000

Mitsubishi T120ss MPI (Euro2) VS T120ss Karburator

Emisi yang dihasilkan oleh sistem MPI lebih ramah lingkungan dari pada sistem karburator.

KESIMPULAN

- ✓ Engine performa
Max. output & torque sistem MPI lebih besar dari karburator. contoh: max. output & torque kuda MPI 114 Ps & 16,3 Kgm, max. output & torque Kuda karburator 90 Ps & 13,6 Kgm.
- ✓ Fuel consumption
Fuel consumption sistem MPI lebih irit di bandingkan sistem karburator. contoh : T120ss MPI 12,12 Km/l, T120ss karburator 10,85 Km/l (fuel pad).
- ✓ Emisi
Hasil emisi yang dihasilkan sistem MPI lebih ramah lingkungan dari sistem karburator, contoh:

kadar CO dan HC sistem T120ss MPI “hampir nol” dari pada T120ss karburator.

DAFTAR PUSTAKA

- Layne, Ken., *Automotive Engine Performance*. 1986. Canada: John Wiley & Sons, Inc.
- M-Step-II Automatic Trasmision*. Japan: Mitsubishi Motors Cooperation
- M-Step-II Electrical*. Japan: Mitsubishi Motors Cooperation
- M-Step-II Gasoline Engine*. Japan: Mitsubishi Motors Cooperation
- M-Step-II MPI*. Japan: Mitsubishi Motors Cooperation

TEKNIK SEGMENTASI UNTUK CITRA KROMOSOM YANG SALING TUMPANG TINDIH ATAU BERSENTUHAN

Moehammad Sarosa¹

ABSTRAK: Penelitian ini bertujuan untuk mencari teknik/cara segmentasi citra kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan. Tahapan segmentasi citra kromosom terbagi dalam dua tahap yaitu segmentasi sendiri untuk memilah citra kromosom dari citra dasarnya, dan dilanjutkan dengan separasi yaitu memisahkan citra kromosom dari citra utama. Pada penelitian ini dikembangkan suatu teknik segmentasi berdasarkan pada hasil analisis *background* dan *foreground* suatu citra kromosom. Proses analisis *background* dan *foreground* terbagi dalam tiga langkah, langkah pertama melakukan proses penipisan dan deteksi tepian terhadap daerah *background* dan *foreground* citra kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan. Langkah kedua mengekstraksi ciri titik-titik pada kerangka-kerangka hasil proses penipisan dan deteksi tepian. Berdasarkan hasil ekstraksi ciri titik yang diperoleh dilakukan pencarian koordinat posisi pemotongan dan melakukan segmentasi untuk memisahkan citra kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan.

ABSTRACT. This research was aimed to seek the overlaped and/or touched each other of chromosome images segmentation technique/method. The segmentation step of the chromosome divided into two steps namely its segmentation to separate chromosome image from its basic image, after that was continued by separating the chromosome image from its main image. In this research has been developed a segmentation technique based on background and foreground analysis result of the chromosome images. The process of background and foreground analysis consist of three steps, the first step is thinning process and detection to the edges of background and foreground of the chromosome images which were overlaped or touched each other. The second step is extracting the dots features to the frames as the result of thinning and edges detection process. Based on dots features extracting results, the following turn is to seek cutting position coordinate and doing segmentation to separate the chromosome images which were overlaped and/ or touched each other.

Kata kunci: citra kromosom, segmentasi, analisis background/foreground, penipisan kerangka, deteksi tepian.

PENDAHULUAN

Citra kromosom adalah suatu citra yang berisikan sekumpulan kromosom hasil dari pemotretan kromosom-kromosom suatu sel yang sedang mengalami pembelahan. Bentuk maupun posisi suatu kromosom dalam setiap citra kromosom selalu acak seperti ditunjukkan pada Gambar 1. Ketidak-teraturan ini mengakibatkan kemungkinan terjadinya dua atau lebih kromosom saling tumpang tindih atau bersentuhan lebih sering terjadi. Keunikan inilah yang menjadikan penelitian tentang teknik segmentasi citra kromosom menarik untuk dilakukan.



Gambar 1. Citra Kromosom [4]

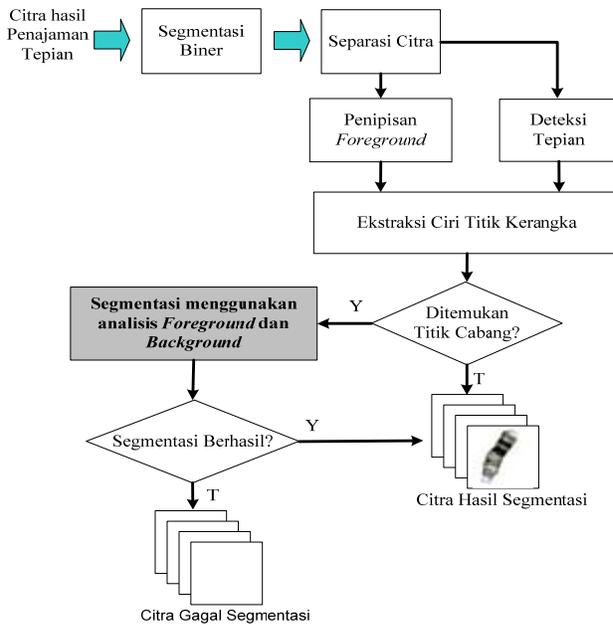
PENGOLAHAN CITRA KROMOSOM

Proses pengolahan citra kromosom merupakan proses awal yang harus dilakukan untuk memperbaiki kualitas citra sebelum dilakukan proses segmentasi dan separasi (pemisahan) citra. Proses pengolahan citra pada penelitian ini menggunakan metoda-metoda yang berbasiskan pada teknik bidang spasial, yaitu penghalusan dan penajaman tepian citra, secara detail dijelaskan pada Gonzales & Wintz, (1992).

SEGMENTASI DAN SEPARASI CITRA

Proses segmentasi citra merupakan proses pemilahan citra sehingga dapat dibedakan dengan citra dasarnya.. Sedangkan proses separasi citra merupakan proses pemisahan segmen citra dari citra utama. Kesuksesan proses klasifikasi citra kromosom diawali dari keberhasilan melakukan proses segmentasi citra. Pada penelitian ini dikembangkan teknik segmentasi citra kromosom menggunakan analisis *background* dan *foreground*. Teknik segmentasi ini dapat dijelaskan melalui diagram alir seperti tampak pada Gambar 2.

¹ Moehammad Sarosa adalah Dosen Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Malang



Gambar 2 Diagram alir Teknik Segmentasi dan Separasi

a. Segmentasi Biner

Segmentasi ini pada prinsipnya memilah daerah-daerah pada citra utama berdasarkan derajat keabuannya. Persamaan (1) akan menyeleksi piksel-piksel citra kromosom sesuai dengan nilai ambang T (Gonzales & Wintz, 1992).

$$R(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{jika } f(x, y) \geq T \\ 0 & \text{sebaliknya} \end{cases} \quad (1)$$

b. Separasi Citra

Separasi citra adalah memisahkan masing-masing citra kromosom menjadi n buah citra tunggal yang disebut segmen. Dalam satu segmen hanya terdapat sebuah citra kromosom. Untuk melakukan proses ini diperlukan dua buah citra, pertama citra asli yang akan dipisah-pisahkan citranya, dan kedua citra hasil proses segmentasi biner sebagai acuan untuk menentukan posisi citra yang akan dipisahkan. Piksel-piksel citra bernilai '1' (mewakili piksel warna hitam) dan '0' (mewakili piksel warna putih).

Proses separasi citra dapat pula dianggap sebagai melakukan pengkopian sekelompok piksel yang membentuk sebuah citra ke n buah tempat citra tunggal. Mekanisme proses separasi citra diperlihatkan pada Gambar 3 dengan urutan pengkopian piksel menggunakan aturan diagram pohon biner. Diagram pohon ini dibangun menggunakan acuan *mask* pengkopian piksel seperti ditampilkan pada Gambar 3b. Setiap piksel $f(x,y)$ memiliki satu atau lebih piksel tetangga yaitu di sebelah timur $f(x+1,y)$, di sebelah barat $f(x-1,y)$ dan di sebelah selatan $f(x,y+1)$ kecuali piksel

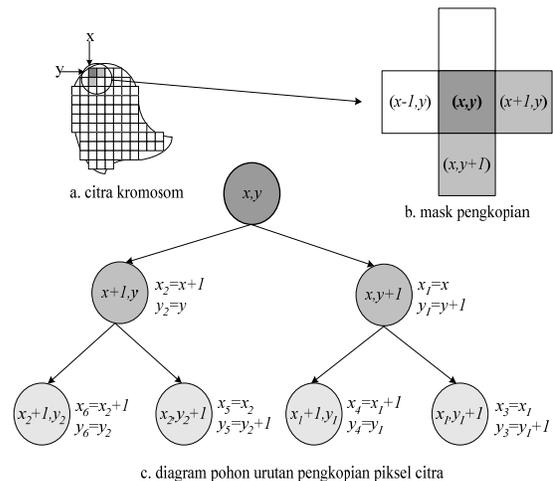
terakhir. Dengan dimulai dari piksel paling utara dan timur, $f(x,y)$ *mask* pengkopian digerakkan, sesuai koordinat piksel tetangganya di sebelah timur $(x-1,y)$ dan di sebelah barat $(x+1,y)$. Algoritma pengkopian dapat digunakan untuk melakukan separasi citra.

Pada proses pengkopian citra ini melibatkan 3 buah citra, yaitu:

- ◆ Citra $A(x,y)$: citra asli yang akan dikopikan.
- ◆ Citra $B(x,y)$: citra hasil segmentasi biner.
- ◆ Citra $C_i(x,y)$: citra sebagai tujuan pengkopian.

Algoritma pengkopian citra terdiri atas beberapa tahap berikut

1. Atur nilai $i=1$, sebagai nomor urut segmen (citra hasil separasi).
2. Berawal dari posisi koordinat (1,1) atau kiri-atas citra, cari piksel bernilai '1' pada Citra B dan catat koordinatnya sebagai (x,y) yaitu sebagai penunjuk posisi piksel yang akan dikopikan.
3. Dengan menggunakan koordinat (x,y) sebagai penunjuk, lakukan:
 - ◆ $C_i(x,y) = A(x,y)$ untuk $i=1,2,3 \dots n$
 - ◆ $B(x,y) = 0$
4. Dengan mengacu ke diagram pohon pada Gambar gunakan *mask* pengkopian untuk menentukan posisi (x_j,y_j) untuk $j=1,2,3, \dots m$. Koordinat (x_j,y_j) adalah penunjuk lokasi pengkopian berikutnya, koordinat ini menunjukkan posisi piksel '1' di sekitar koordinat (x,y) , yaitu di sebelah timur, dan selatan (x,y) . Pindahkan penunjuk (x_j,y_j) ke (x,y) dan ulangi langkah 3 dan 4 sampai piksel '1' dalam satu segmen habis.
5. Kembali ke langkah 2 untuk mengkopikan citra berikutnya. Ulangi langkah ini untuk nilai $i=i+1$ sampai semua citra habis terkopikan, dan nilai i menunjukkan jumlah segmen citra yang ada pada citra A .



Gambar 3 Metode pengkopian citra pada proses separasi

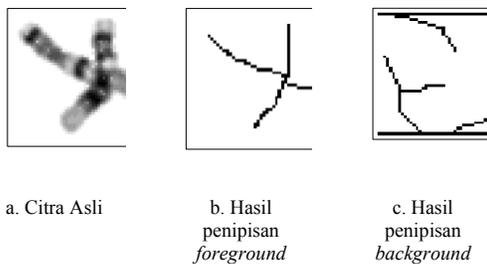
c. Deteksi Tepian Citra

Proses ini untuk mencari batas-batas tepi citra kromosom sebagai proses awal sebelum dilakukan ekstraksi ciri titik kerangka dan segmentasi citra menggunakan analisis *foreground* dan *background* jika ditemukan titik cabang. Untuk mencari batas tepi suatu citra kromosom digunakan konsep gradient, secara lebih detail dijelaskan pada Gonzalez & Wintz (1992).

d. Penipisan *Foreground* dan *Background*

Tujuan dilakukan proses penipisan suatu objek adalah untuk mendapatkan kerangka objek. Penelitian ini melakukan dua kali proses penipisan yaitu penipisan terhadap objek (*foreground*) dan penipisan terhadap latar belakang objek (*background*). Untuk melakukan penipisan kedua daerah tersebut digunakan algoritma yang dikembangkan oleh Zhang & Suen (1984) seperti apa yang dijelaskan pada Gonzalez & Wintz (1992).

Penipisan ini diterapkan pada citra kromosom tunggal, sebelum melakukan penipisan, citra yang akan ditipiskan harus disegmentasi biner sehingga derajat keabuan piksel-piksel citra tersebut berubah menjadi bernilai '1' dan '0'. Untuk melakukan penipisan kedua daerah *foreground* dan *background* perlu memperhatikan nilai piksel daerah yang akan dilakukan penipisan. Proses penipisan ini hanya akan mempengaruhi daerah yang nilai pikselnya '1', sehingga dalam menggunakan algoritma ini nilai piksel bagi daerah yang akan ditipiskan dibuat sedemikian hingga bernilai '1'. Jadi dalam melakukan penipisan daerah *foreground* dan *background*, hanya diperlukan membalikan nilai piksel, yang sebelumnya bernilai '1' dibalik menjadi bernilai '0', begitu pula sebaliknya. Gambar 4 menampilkan citra asli dan hasil penipisan *foreground* serta penipisan *background*.



Gambar 4 Citra hasil proses penipisan

e. Ekstraksi Ciri Titik pada Kerangka

Citra kromosom hasil segmentasi merupakan citra tunggal, tetapi ada kalanya terdapat citra yang merupakan gabungan dua atau lebih kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan. Untuk mengetahui ada tidaknya kromosom yang bersilangan

perlu dilihat kerangka *foreground* kromosom tersebut. Terdapat tiga macam titik ciri yang dapat diekstraksi dari sebuah kerangka *foreground* (Chen & Wang, 2000) yaitu:

- ◆ *End Point* : titik akhir/ujung suatu kerangka
- ◆ *Fork Point* : titik percabangan suatu kerangka
- ◆ *Corner Point*: titik sudut suatu belokan kerangka

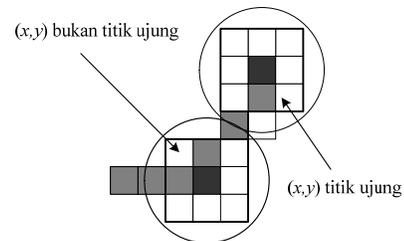
Berikut ini ditampilkan algoritma yang dapat digunakan untuk mengekstraksi ciri titik-titik pada kerangka *foreground*.

➤ **Algoritma untuk mencari *end point*:**

Membuat *mask* 3x3 dan suatu titik (x,y) dikategorikan sebagai ujung suatu kerangka jika terpenuhi salah satu kriteria berikut:

- ◆ jumlah sisi samping yang berpiksel '000' = 3
- ◆ jumlah sisi samping yang berpiksel '000' = 2 dan jumlah piksel pada salah satu garis tengah *mask*=2.

Gambar 5 menunjukkan contoh titik yang merupakan suatu titik cabang dan bukan titik cabang.



Gambar 5 Contoh titik cabang dan bukan titik cabang

w_{23} (x-2,y-2)	w_{24} (x-1,y-2)	w_9 (x,y-2)	w_{10} (x+1,y-2)	w_{11} (x+2,y-2)
w_{22} (x-2,y-1)	w_8 (x-1,y-1)	w_1 (x,y-1)	w_2 (x+1,y-1)	w_{12} (x+2,y-1)
w_{21} (x-2,y+2)	w_7 (x-1,y)	w (x,y)	w_3 (x+1,y)	w_{13} (x+2,y)
w_{20} (x-2,y+1)	w_6 (x-1,y+1)	w_5 (x,y+1)	w_4 (x+1,y+1)	w_{14} (x+2,y+1)
w_{19} (x-2,y+2)	w_{18} (x-1,y+2)	w_{17} (x,y+2)	w_{16} (x+1,y+2)	w_{15} (x+2,y+2)

Gambar 6 *Mask* 5x5 untuk mencari titik cabang

➤ **Algoritma untuk mencari *fork point*:**

- ◆ Membuat *mask* 5x5 dengan pusat w(x,y)
- ◆ Di pusat *mask* 5x5 dibuat *mask* 3x3
- ◆ Cari piksel w_n di sisi *mask* 5x5 yang bernilai '1' yang memiliki tetangga di sisi *mask* 3x3, jika piksel tersebut memiliki tetangga piksel '1' maka atur $h_n=1$, jika tidak $h_n=0$, dengan $n=9,10,11, \dots 24$.

- ◆ Cari piksel w_m di sisi *mask* 3x3 yang bernilai '1' yang memiliki tetangga di sisi *mask* 5x5, jika piksel tersebut memiliki tetangga piksel '1' maka atur $h_m=1$, jika tidak $h_m=0$, dengan $m=1, 2, 3, \dots, 8$.
- ◆ Piksel $w(x,y)$ merupakan titik percabangan jika

$$\sum_{n=1}^{24} h_n \geq 3 \text{ dan } \sum_{m=1}^8 h_m \geq 3$$

Misalkan diperoleh kerangka seperti tampak pada Gambar 7, pada *Mask* 5x5A piksel yang bernilai '1' ada pada w_{12}, w_{20}, w_2 dan w_7 sedangkan pada *Mask* 5x5B piksel yang bernilai '1' ada pada $w_{11}, w_{15}, w_{18}, w_{24}, w_1, w_2, w_4$ dan w_5 . Dengan kondisi kerangka seperti tersebut maka:

Untuk *mask* 5x5A diperoleh : $\sum_{n=1}^{24} h_n = h_{12} + h_{20} = 2$ dan

$\sum_{m=1}^8 h_m = 1$ sehingga kondisi $\sum_{n=1}^{24} h_n \geq 3$ dan $\sum_{m=1}^8 h_m \geq 3$ tidak

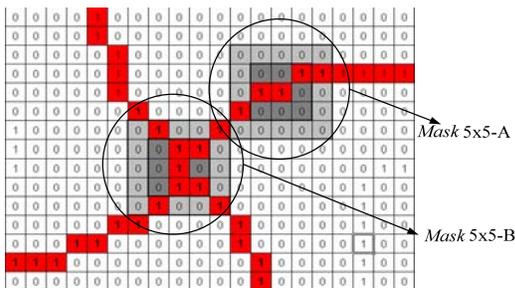
terpenuhi, jadi piksel pada pusat *mask* 5x5-A bukanlah titik potong.

Sedangkan untuk *mask* 5x5B diperoleh : $\sum_{n=1}^{24} h_n = h_{11} +$

$h_{15} + h_{18} + h_{24} = 4$ dan $\sum_{m=1}^8 h_m = h_1 + h_2 + h_4 + h_5 = 4$

sehingga kondisi $\sum_{n=1}^{24} h_n \geq 3$ dan $\sum_{m=1}^8 h_m \geq 3$ terpenuhi jadi

piksel pada pusat *mask* 5x5-B adalah titik potong.

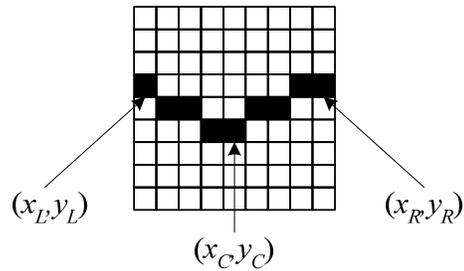


Gambar 7 Contoh kerangka dengan titik potong.

➤ **Algoritma untuk mencari Corner point:**

Membuat *mask* 9x9 dan mencari piksel bernilai '1' pada masing-masing sisi *mask* sebagai (x_L, y_L) dan (x_R, y_R) , titik (x_C, y_C) sebagai titik sudut, sudut belok ini dapat diperoleh menggunakan Persamaan (4.14).

$$angle = \left[\tan^{-1} \left(\frac{y_R - y_C}{x_R - x_C} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{y_C - y_L}{x_C - x_L} \right) \right] \quad (2)$$



Gambar 8 *Mask* mencari titik sudut

Tabel 1 menampilkan contoh hasil ekstraksi ciri kerangka *foreground* dan banyaknya citra kromosom dalam satu citra, kesimpulan terhadap banyaknya citra kromosom terangkum sebagai berikut:

- ◆ Sebuah citra kromosom, jika hanya ditemukan dua buah titik ujung kerangka.
- ◆ Dua citra kromosom bersentuhan, jika ditemukan tiga buah titik ujung kerangka dan sebuah titik percabangan.
- ◆ Dua citra kromosom bersilangan, jika ditemukan empat buah titik ujung kerangka dan sebuah titik percabangan.
- ◆ Lebih dari dua citra kromosom tumpang tindih atau bersentuhan, jika ditemukan sebuah atau lebih titik cabang dan lebih dari empat buah titik ujung (kasus ini tidak termasuk dalam penelitian).

Tabel 1 Contoh hasil ekstraksi ciri kerangka *foreground* dan kesimpulannya.

Citra Asli	Kerangka <i>Foreground</i>	Hasil ekstraksi ciri	Kesimpulan
		2 titik ujung tanpa titik potong	Citra kromosom Tunggal
		3 titik ujung 1 titik potong	Citra kromosom Ganda Bersentuhan
		4 titik ujung 1 titik potong	Citra Kromosom Ganda Tumpang tindih
		6 titik ujung 2 titik potong	Lebih dari dua citra Kromosom Tumpang tindih

f. Segmentasi menggunakan Analisis *foreground* dan *background*

Citra kromosom yang tumpang tindih atau bersentuhan harus dipisahkan atau dipotong sehingga diperoleh dua buah segmen citra kromosom. Pada penelitian ini citra kromosom yang tumpang tindih atau bersentuhan dibedakan dalam dua kategori, Tabel 2 memperlihatkan gaya sentuhan citra kromosom.

Tabel 2 Gaya sentuhan citra kromosom

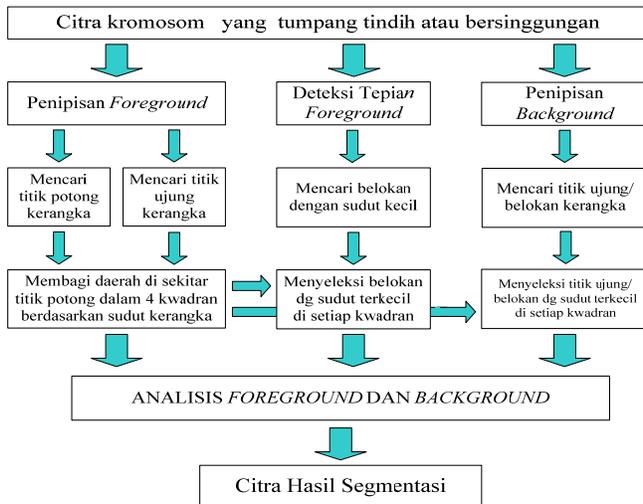
Kategori	Tipe	Gaya Sentuhan	Contoh
Ber-sentuhan	1		
Tumpang tindih	2		

Penelitian ini menggunakan analisis terhadap ciri-ciri yang diperoleh dari hasil penipisan *foreground* dan *background* serta deteksi tepian *foreground*. Gambar 9 memperlihatkan tahapan yang harus dilakukan sebelum proses segmentasi.

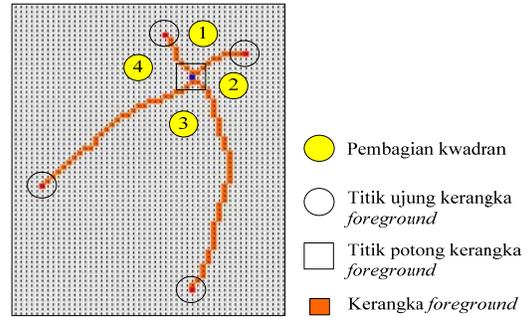
Tahapan proses sebelum dilakukan analisis *foreground* dan *background* dapat dikelompokkan dalam tiga tahap tergantung pada data yang digunakan, yaitu:

a. Melakukan penipisan *foreground*

Dari hasil penipisan *foreground* akan diperoleh titik-titik ujung, titik potong dan percabangan kerangka. Berdasarkan posisi titik potong dan cabang kerangka, daerah di sekitar titik potong dibagi ke dalam 4 kwadran sebagai kriteria dalam mencari posisi pemotongan segmen. Gambar 10 menampilkan pembagian kwadran daerah di sekitar titik potong kerangka *foreground*.



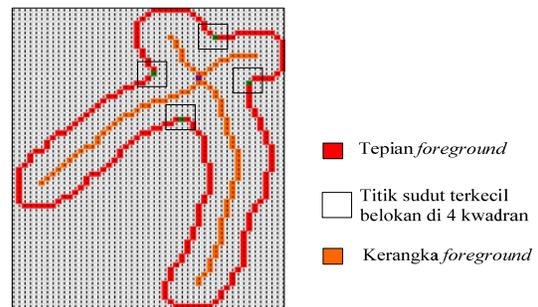
Gambar 9 Diagram proses segmentasi citra kromosom



Gambar 10 Pembagian kwadran

b. Mendeteksi tepian *foreground*

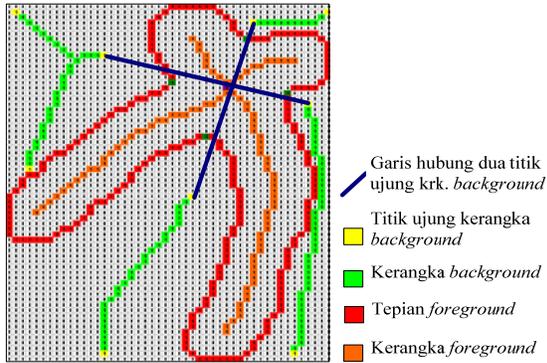
Hasil dari penipisan *foreground* berupa garis tipis yang mengelilingi citra, di sepanjang garis ini akan diperoleh belokan-belokan dengan sudut yang bervariasi. Belokan yang memiliki sudut terkecil dalam satu kwadran dipilih sebagai kandidat posisi pemotongan segmen. Gambar 11 menampilkan tepian *foreground* dan 4 titik belok dengan sudut terkecil yang terdapat pada masing-masing kwadran sebagai kandidat posisi pemotongan segmen.



Gambar 11 Tepian *foreground* dan titik belok

c. Melakukan penipisan daerah *background*

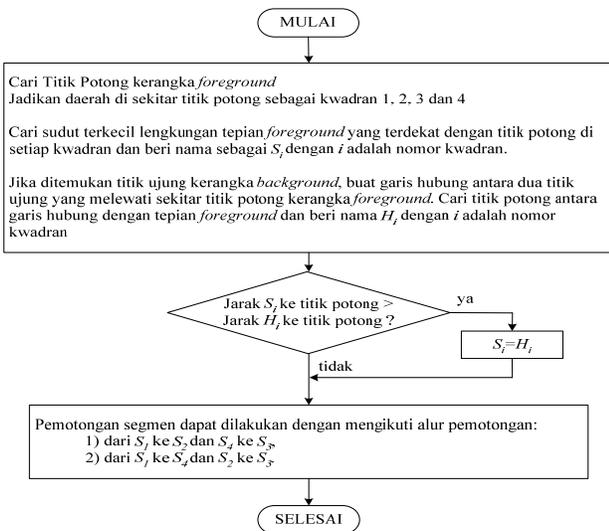
Karena kompleksnya bentuk *background* suatu citra, maka hasil penipisan daerah ini akan memberikan tiga kemungkinan bentuk kerangka, yaitu kerangka yang hanya memiliki titik ujung (kerangka berbentuk garis lurus), kerangka yang selain memiliki titik ujung juga memiliki belokan dan kerangka yang selain memiliki titik ujung juga memiliki titik cabang. Titik cabang ini diabaikan karena ciri yang dimilikinya tidak dapat digunakan untuk menentukan posisi pemotongan segmen. Berdasarkan pembagian kwadran dari proses sebelumnya, dicari titik ujung atau titik belok dengan sudut terkecil dan paling dekat dengan titik potong kerangka *foreground* (pusat percabangan kerangka). Gambar 12 menampilkan kerangka *background* dan titik-titik ujung terdekat dengan titik potong kerangka *background*. Dua titik ujung kerangka *background* yang terdekat dengan titik potong kerangka *foreground* dihubungkan dari kwadran 1 ke kwadran 3 dan kwadran 2 ke kwadran 4. Perpotongan garis-garis tersebut dengan tepian *foreground* merupakan kandidat lain posisi pemotongan segmen.



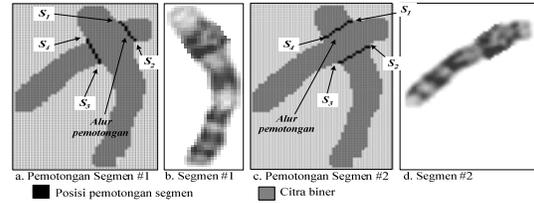
Gambar 12 Kerangka *background* dan titik ujungnya

d. Analisis foreground dan background

Pada tahap ini dilakukan penentuan terakhir posisi dan alur pemotongan segmen. Berdasarkan ciri-ciri yang diperoleh dari hasil penipisan *background*, *foreground*, dan deteksi tepian maka penentuan posisi dan alur pemotongan segmen citra dapat diikuti diagram yang ditampilkan pada Gambar 13. Contoh hasil segmentasi citra kromosom yang bersilangan ditampilkan pada Gambar 14. Gambar a. menunjukkan posisi dan alur pemotongan segmen citra pertama, Gambar b. menampilkan citra hasil segmentasi pertama, Gambar c. menunjukkan posisi dan alur pemotongan citra kedua, dan Gambar d. menampilkan citra hasil segmentasi kedua.



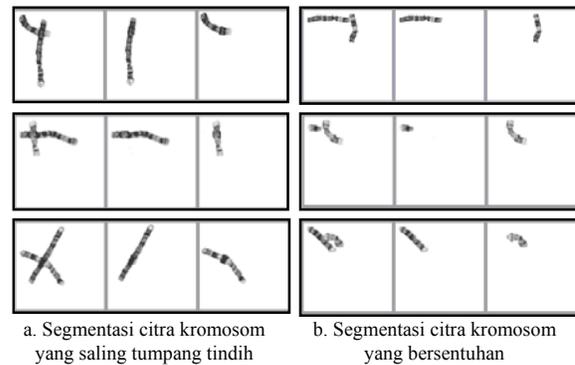
Gambar 13 Diagram alir teknik segmentasi menggunakan analisis *foreground* dan *background*.



Gambar 14 Contoh pemotongan citra dan hasilnya

PEMBAHASAN DAN HASIL

Dengan menggunakan algoritma-algoritma di atas dan diagram alir seperti pada Gambar 13, penelitian ini telah berhasil melakukan pemotongan citra kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan. Beberapa contoh hasil pemotongan citra kromosom diperlihatkan pada Gambar 15.



Gambar 15 Contoh hasil segmentasi citra kromosom

Penggunaan diagram alir pada Gambar 13 terbatas pada dua citra kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan, sedangkan untuk jumlah citra kromosom yang lebih banyak perlu dilakukan pengembangan algoritma lebih lanjut. Perlu dilakukan pengujian jumlah titik cabang dalam suatu kerangka *foreground* dan proses segmentasi dilakukan sebanyak jumlah totok potong tersebut. Untuk kasus-kasus tertentu dimana suatu teknik segmentasi tidak dapat dilakukan karena kompleksnya citra, maka dilakukan pengujian dengan mengganti citra kromosom namun masih dari pasien yang sama.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan dapat diambil kesimpulan dan saran sebagai berikut.

- ◆ Proses pengolahan citra merupakan proses yang tidak dapat dipisahkan dalam melakukan segmentasi citra kromosom.
- ◆ Algoritma pemotongan dengan membagi citra dalam 4 kwadran di sekitar titik potong kerangka *foreground* telah dapat menentukan posisi pemotongan citra kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan.
- ◆ Penelitian ini telah berhasil melakukan pemotongan terhadap dua kromosom yang saling tumpang tindih atau bersentuhan, sedangkan untuk jumlah kromosom yang

lebih banyak lagi masih perlu dilakukan pengembangan terhadap algoritma pemotongan citra kromosom.

DAFTAR PUSTAKA

- Chen, YK, Segmentation of Single- or Multiple-Touching Handwritten Numeral String Using Background and Foreground Analysis, IEEE Trans. On Pattern Analysis and Machine Intelligence, Vol. 22, No. 11, Nov. 2000.*
- Errington, P.A. and Graham, J. Classification of Chromosomes using a Combination of Neural Networks, Department of Medical Biophysics, University of Manchester, Oxford Road, Manchester, UK, 1996.*
- Gonzales, RC. And Wintz, P, Digital Image Processing, Addison-Wesley Publishing Company, California, USA, 1992.*
- Lerner, B., Toward A Completely Automatic Neural Network Based Human Chromosome Analysis, IEEE Trans. on System, Man, Cybernetics Special issue on ANN, vol 28, pt. B, pp. 544-552, New York, USA, 1998.*
- Martinez, C., Juan, A. and Casacuberta, F, Using Recurrent Neural Networks for Automatic Chromosome Classification, Universidad Politecnica den Valencia, Valencia, Spain, 2002.*
-

ESTIMASI TINGKAT ISOLASI DASAR TRANSFORMATOR MELALUI SIMULASI NUMERIK

Wasimudin Surya S¹

ABSTRAK: Bila suatu peralatan listrik seperti transformator daya mengalami modifikasi, maka boleh jadi tingkat isolasi dasar (TID) dari peralatan tersebut juga mengalami perubahan. Berapa besar nilai TID yang baru ini cukup sulit untuk ditentukan. Menurut standar IEC, TID suatu peralatan didefinisikan sebagai ketahanan isolasi peralatan terhadap harga puncak impuls tegangan surja 1,2/50 μ s. Akan tetapi untuk transformator daya yang mengalami modifikasi, standar ini tidak mungkin diterapkan mengingat pada transformator daya pengujian impuls merupakan pengujian jenis (*type test*), artinya hanya dapat dilakukan pada sampel dan merupakan pengujian merusak. Pada tulisan ini diajukan suatu metode untuk mengestimasi TID transformator daya melalui simulasi numerik. Untuk keperluan tersebut dibuat suatu pro-rated transformator satu fasa dengan belitan tegangan rendah dan tegangan tinggi masing-masing terdiri dari 24 lilitan. Model numerik kondisi transien pro-rated ini divalidasi dengan hasil eksperimen penerpaan tegangan impuls dari sumber generator hibrid 3 kV 1,2/50 μ s. Dari hasil eksperimen dan simulasi EMTP diharapkan diperoleh suatu model numerik yang dapat dipergunakan untuk mengevaluasi TID pro-rated transformator ini dan dapat diberlakukan pada transformator yang sebenarnya.

ABSTRACT: If an electrical equipment like power transformers has a modification, maybe the Basic Insulation Level (BIL) of the equipment mentioned will be changed. To decide the new value of the BIL is very complicated. According to the IEC Standards, the BIL of an equipment is defined as an insulation strength of equipment against peak value of impulse voltage 1,2/50 μ s. However, for the modified power transformers, the Standard is impossible to apply because the impulse test on power transformers is type test. It means that it can be done on the sample and it is considered as the destruction test. This paper describes a method to estimate the BIL of power transformers through numeric simulation. For the need mentioned, a pro-rated of single phase transformers is made. This pro-rated consists of high and low voltage winding which has 24 turns each. The numeric model which represented transient conditions of this pro-rated is validated with the result of the impulse voltage application experiment from the hybrid generator 3 kV 1,2/50 μ s source. In the hope of getting a numeric model that can be used to evaluate the BIL of this pro-rated and it can be used to the real transformers, the result of experiment and EMTP simulation are compared.

Kata kunci : *tingkat isolasi dasar, pro-rated, model numerik, EMTP*

PENDAHULUAN

Adanya gejala peralihan (*transient*) pada sistem tenaga listrik, baik yang timbul sebagai akibat fenomena alam (petir) atau karena peristiwa alih hubung (*switching*) pada jaringan, dapat membawa dampak yang tidak menguntungkan bagi peralatan listrik, karena tegangan lebih yang muncul akibat peralihan ini dapat menimbulkan stress medan elektrik pada bagian-bagian isolasi dari peralatan, dan apabila stress medan elektrik itu terjadi dengan intensitas yang cukup tinggi atau perioda yang panjang dapat berakibat pada degradasi atau bahkan kerusakan material isolasi peralatan.

Sebagai salah satu komponen peralatan yang memiliki peranan penting dan vital dalam sistem tenaga listrik, transformator tenaga dalam pengoperasiannya ternyata memiliki probabilitas tinggi untuk mengalami terpaan tegangan lebih peralihan. Oleh karena itu sekalipun transformator telah dilindungi oleh berbagai peralatan proteksi, namun ia pun harus mempunyai kemampuan mengamankan dirinya sendiri yaitu dengan ketahanan isolasi yang memadai. Batas ketahanan isolasi ini biasanya

dinyatakan dengan *Basic Insulation Level (BIL)* atau Tingkat Isolasi Dasar (TID), yang menurut standar IEC didefinisikan sebagai ketahanan isolasi peralatan terhadap harga puncak dari tegangan impuls 1,2/50 μ s.

Karena alasan ekonomis, *reinsulation* atau pun modifikasi dari transformator merupakan cara yang cukup sering diambil sebagai jalan keluar apabila suatu transformator mengalami kerusakan yang memerlukan penggantian material isolasi. Akan tetapi, bila suatu peralatan listrik seperti transformator mengalami modifikasi, maka boleh jadi TID dari transformator tersebut juga mengalami perubahan. Berapa besar nilai TID yang baru ini cukup sulit ditentukan karena selain membutuhkan peralatan uji khusus yang biasanya hanya dimiliki oleh pabrikan, pengujian tegangan impuls juga dapat berdampak pada degradasi ketahanan isolasi.

Pada transformator, proses pengujian impuls termasuk dalam kategori pengujian jenis (*type test*). Menurut IEC-76, uji jenis adalah pengujian yang dikenakan terhadap sebuah transformator yang mewakili transformator lainnya yang sejenis, untuk

¹ Wasimudin Surya S adalah Dosen Jurusan Pendidikan Teknik Elektro UPI

menunjukkan bahwa semua transformator jenis ini dapat memenuhi persyaratan yang ditentukan, yang belum tercakup dalam pengujian rutin. Sebuah transformator dapat dinyatakan mewakili transformator lainnya bila transformator tersebut identik satu sama lain, baik kemampuan maupun konstruksinya, tetapi uji jenis dapat juga dinyatakan berlaku bila dikenakan terhadap sebuah transformator yang sedikit berbeda (*minor deviation*), baik kemampuan maupun karakteristik lainnya.

Pada penelitian ini akan dipelajari perilaku dari belitan transformator terhadap terpaan tegangan impuls dengan mempergunakan perangkat lunak EMTP. Hasil simulasi EMTP ini kemudian divalidasi dengan eksperimen penerpaan tegangan impuls dari sumber generator hibrid 3 kV 1,2/50 μ s pada belitan *pro-rated* transformator. Dengan menganalisis hasil simulasi dan hasil validasi eksperimental, diharapkan diperoleh suatu metode untuk mengestimasi TID transformator daya melalui simulasi numerik. Penentuan TID dengan cara ini diharapkan dapat menjadi metode substitusi terhadap metode penentuan TID dengan pengujian tegangan impuls secara langsung.

KAJIAN PUSTAKA

Wagner, K.W. (1915), membahas penalaran gelombang dalam belitan transformator melalui konsep gelombang berdiri dengan memperkenalkan rangkaian ekuivalen belitan trafo untuk penerpaan tegangan impuls. Wagner membuat penyederhanaan kondisi nyata dengan mengabaikan induktansi bersama antar belitan dan efek peredaman dari rugi arus eddy pada osilasi tegangan. Dalam penelitiannya, distribusi tegangan pada belitan transformator dibagi ke dalam tiga periode, yakni periode distribusi tegangan permulaan (*initial*), periode osilasi tegangan, dan periode distribusi tegangan akhir.

A. Morched, L. Marti, J. Ottevangers (1993), membahas model untuk mensimulasikan perilaku frekuensi tinggi dari transformator tenaga. Model ini didasarkan pada karakteristik frekuensi dari matriks admitansi transformator antara terminal-terminalnya pada rentang frekuensi yang diberikan. Karakteristik admitansi transformator dapat diperoleh dari pengukuran atau dari detail model internal yang didasarkan pada tata letak fisik transformator. Model ini direalisasikan dalam bentuk jaringan RLC dalam format yang bisa digunakan langsung pada EMTP.

Karsai K., Kerenyi D., Kiss L., dalam pembahasannya mengenai desain isolasi internal transformator memberikan data tegangan tembus frekuensi daya dan tegangan tembus impuls petir dari isolasi antar lilitan kertas Kraft yang diimpregnasi minyak sebagai fungsi dari ketebalan lapisan isolasi antara belitan yang berdekatan, yakni dua kali ketebalan isolasi pada konduktor. Nilai tegangan ini merupakan nilai minimum yang dihasilkan dari serangkaian eksperimen dan biasanya digunakan sebagai acuan dalam desain ketebalan isolasi antar

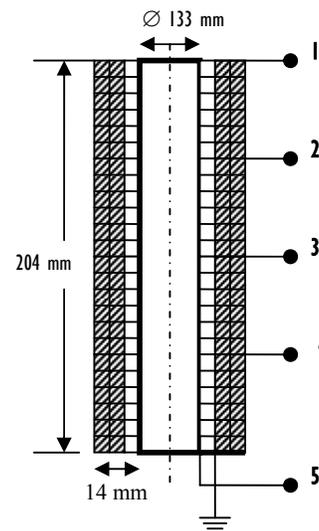
lilitan untuk transformator yang menggunakan bahan isolasi kertas Kraft yang diimpregnasi minyak.

Allan Greenwood dalam bukunya mengenai transien elektrik pada sistem tenaga menyatakan bahwa distribusi tegangan lebih pada belitan transformator menunjukkan 60% stress tegangan lebih ditanggung oleh 20% belitan dekat terminal transformator. Stress akibat gradien tegangan di 20% belitan awal ini dapat merusak isolasi belitan tersebut.

IEC Publication 76 membahas mengenai standar transformator tenaga, yang terdiri dari standar umum, kenaikan temperatur, tingkat isolasi dan pengujian dielektrik, penyadapan dan hubungan, dan kemampuan menahan hubung-singkat. Sedangkan **IEC Publication 60, IEEE Std 4** membahas mengenai teknik standar untuk pengujian tegangan tinggi yang berisi definisi umum dan keperluan pengujian serta sistem pengukuran.

METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, dibuat suatu benda uji berupa *pro-rated* transformator satu fasa dengan belitan tegangan rendah dan tegangan tinggi masing-masing terdiri dari 24 lilitan (lihat Gambar 1). *Pro-rated* ini merupakan transformator yang dibuat dengan dimensi yang lebih kecil (pada penelitian ini diambil skala 1 : 10), tetapi memiliki bahan dan ketebalan isolasi yang sama dengan transformator yang sebenarnya. Belitan tegangan tinggi *pro-rated* ini mempunyai beberapa titik sadapan atau tap sehingga akan memudahkan dalam pengukuran tegangan pada setiap panjang belitan tertentu.



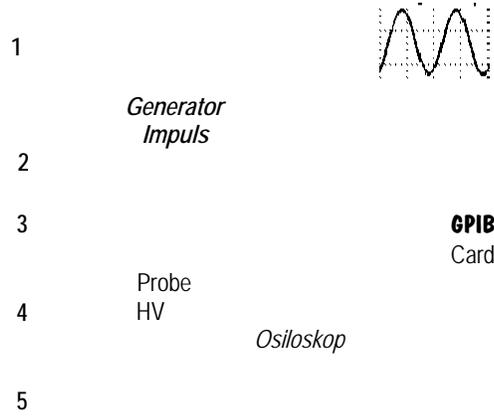
Gambar 1. Pro-rated transformator

Pada tap-1 belitan tegangan tinggi *pro-rated* ini selanjutnya diterapkan tegangan impuls dari sumber generator hibrid 3 kV 1,2/50 μ s, sedangkan belitan

tegangan rendah dihubung-singkat dan dibumikan. Selanjutnya tegangan impuls yang terjadi pada tap-2, 3 dan 4 diukur dan ditampilkan melalui layar osiloskop.

Untuk mengetahui bentuk gelombang tegangan yang terdistribusi sepanjang belitan transformator, digunakan osiloskop Tektronix TDS 220 yang

dilengkapi modul TDS2MM (*Measurement Extension Module*). Grafik yang ditampilkan oleh osiloskop ini kemudian dipindahkan melalui GPIB (*General Purpose Interface Bus*) ke komputer yang telah dilengkapi dengan perangkat lunak WaveStar versi 2.4 buatan Tektronix.

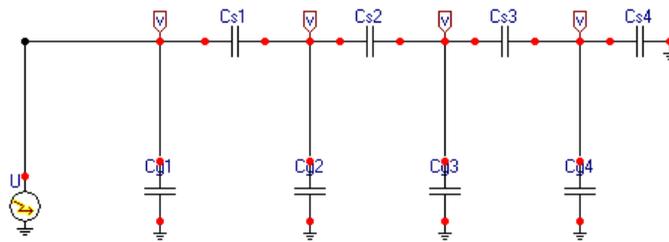


Gambar 2. Rangkaian percobaan distribusi tegangan impuls pada belitan pro-rated transformator

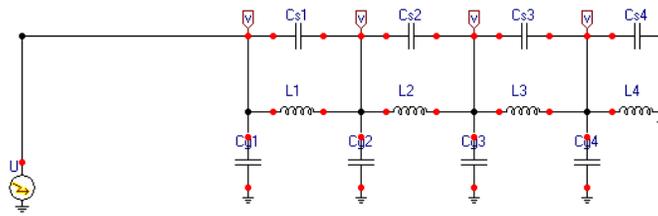
Pada frekuensi rendah, distribusi tegangan dalam belitan bersifat linier karena fluksi magnetik melingkupi seluruh lilitan, sedangkan pada frekuensi yang lebih tinggi nilai tersebut juga ditentukan oleh kapasitansi. Pada penelitian ini, digunakan 3 (tiga) model rangkaian ekuivalen yang merepresentasikan kondisi transien belitan transformator, yakni :

- a. Model rangkaian 1 (Gambar 3): hanya mengikutsertakan kapasitansi (antar tap-tap belitan dan antar tap belitan ke tanah);
- b. Model rangkaian 2 (Gambar 4): selain kapasitansi, induktansi belitan juga diikutsertakan;
- c. Model rangkaian 3 (gambar 5): mengikutsertakan nilai kapasitansi dan induktansi belitan serta resistansi yang merepresentasikan rugi inti.

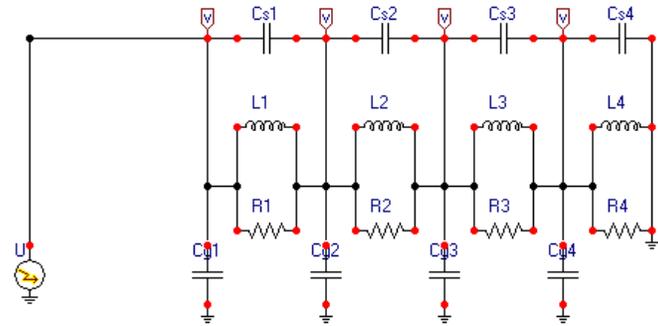
Nilai konstanta dari model ini dapat diperoleh melalui perhitungan (dari dimensi) maupun melalui pengukuran. Model awal yang telah diketahui konstanta-konstantanya ini kemudian disimulasikan melalui perangkat lunak EMTP untuk mendapatkan profil distribusi tegangan impuls sepanjang belitan prototype trafo. Hasil simulasi ini kemudian divalidasi dengan eksperimen penerpaan tegangan impuls dari sumber generator hibrid 3 kV 1,2/50 μ s pada belitan tegangan tinggi prototype trafo (belitan tegangan rendah dihubung-singkat dan dibumikan). Apabila hasil simulasi mendekati hasil eksperimen, maka model ini dapat digunakan untuk proses selanjutnya yakni mengevaluasi TID prototype trafo.



Gambar 3. Model rangkaian 1



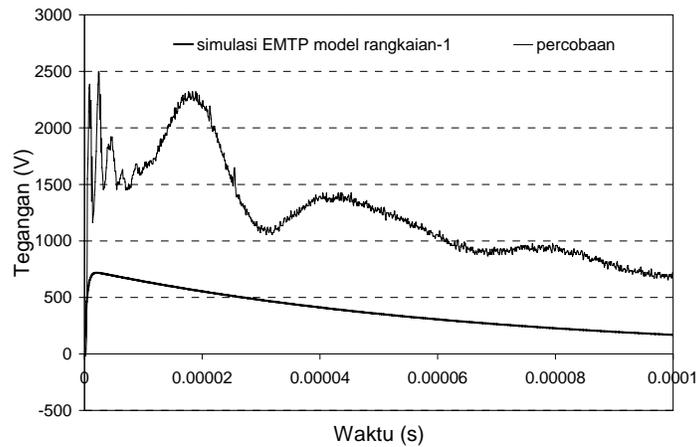
Gambar 4. Model rangkaian 2



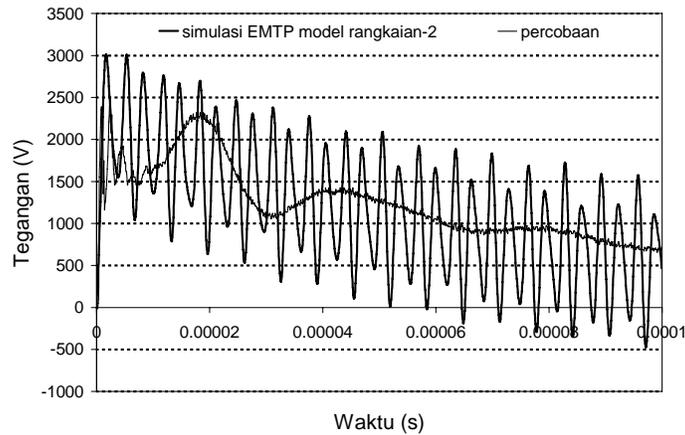
Gambar 5. Model rangkaian 3

HASIL DAN ANALISIS

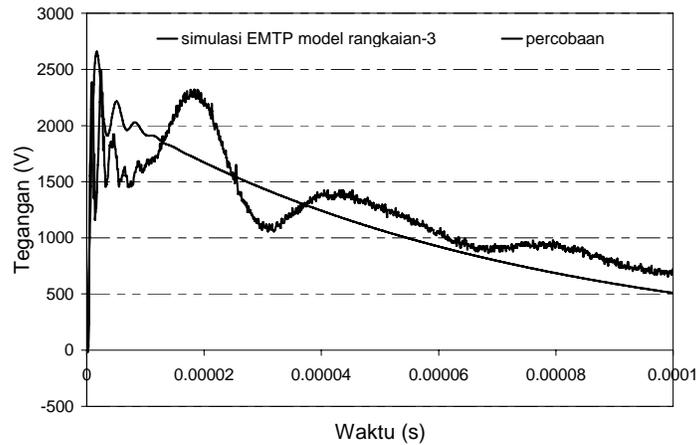
Hasil eksperimen dan simulasi EMTP diberikan pada Gambar 6, 7 dan 8.



Gambar 6. Tegangan impuls belitan trafo pada tap-2 (hasil percobaan dan hasil simulasi EMTP untuk model rangkaian-1) input 3 kV



Gambar 7. Tegangan impuls belitan trafo pada tap-2 (hasil percobaan dan hasil simulasi EMTD untuk model rangkaian-2) input 3kV



Gambar 8. Tegangan impuls belitan trafo pada tap-2 (hasil percobaan dan hasil simulasi EMTD untuk model rangkaian-3) input 3 kV

Distribusi tegangan lebih pada belitan transformator menunjukkan 60% stress tegangan lebih ditanggung oleh 20% belitan dekat terminal transformator. Stress akibat gradien tegangan di 20% belitan awal ini dapat merusak isolasi belitan tersebut. Dengan mengacu pada hal ini, maka untuk proses simulasi selanjutnya belitan *pro-rated* trafo antara tap-1 dan tap-2 akan dibagi-bagi lagi menjadi segmen yang lebih kecil sehingga setiap dua lilitan trafo yang berurutan memiliki satu kapasitansi seri. Ini berarti bahwa beda tegangan yang terjadi antara ujung-ujung kapasitor ini akan ditanggung oleh isolasi yang berada diantara dua lilitan tersebut. Selanjutnya rangkaian

simulasi yang ada pada Gambar 5 dikembangkan sehingga jumlah komponen R, L dan C antara tap-1 dan tap-2 mewakili jumlah lilitan yang ada diantara kedua tap tersebut.

Proses berikutnya adalah melakukan simulasi menggunakan model rangkaian 3 yang telah dikembangkan dengan menaikkan secara bertahap tegangan input sampai diperoleh nilai tegangan antara ujung-ujung kapasitor yang sesuai dengan tabel berikut, yakni tegangan tembus impuls petir dari isolasi antar-lilitan kertas Kraft sebagai fungsi dari ketebalan lapisan isolasi antara dua lilitan yang berdekatan (2δ).

2 δ (mm)	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5
U _d (kV)	9,1	18,2	27,3	36,4	40,9	69,6	91,3	110,3	123,5

Tabel 1. Tegangan tembus impuls petir isolasi antar-lilitan

Karena tebal isolasi antar-lilitan yang digunakan pada *pro-rated* trafo adalah 0,1 mm, maka berdasarkan data pada Tabel 4.1, simulasi harus dilakukan sampai diperoleh beda tegangan antara ujung-ujung kapasitor sebesar 9,1 kV. Dari hasil simulasi diketahui bahwa

nilai ini pertama kali dicapai pada $t = 0,4 \mu\text{s}$ antara lilitan-1 dan lilitan-2 (dua lilitan berurutan yang paling dekat dengan terminal sumber) untuk tegangan input 102,654 kV.

Waktu	Probe a1	Probe a2	Probe a3	Probe a4	.....
0	0	0	0	0	.....
1.00E-07	22286.82	17668.37	13932.66	10893.05	.....
2.00E-07	39668.87	32221.65	26028.83	20856.18	.....
3.00E-07	53218.35	44391.3	36801.49	30264.59	.....
4.00E-07	63773.07	54673.08	46535.08	39278.83	.....
5.00E-07	71987.69	63399.25	55362.32	47916.36	.....
6.00E-07	78373.79	70795.33	63325.81	56110.44	.....
7.00E-07	83331.12	77022.24	70424.5	63756.07	.....
8.00E-07	87172.03	82205.79	76646.08	70743.26	.....
9.00E-07	90140.63	86455.34	81987.29	76979	.....
1.00E-06	92427.64	89874.16	86464.09	82399.53	.....
1.10E-06	94182.08	92563.64	90114.55	86974.95	.....
1.20E-06	95520.43	94623.55	92996.6	90708.3	.....
1.30E-06	96533.69	96150.11	95182.95	93631.01	.....
1.40E-06	97292.97	97233.34	96754.79	95796.52	.....
1.50E-06	97853.82	97954.44	97795.82	97273.27	.....
.....

Tabel 2. Cuplikan data hasil simulasi model rangkaian 3 yang telah dikembangkan untuk input 102,654 kV

KESIMPULAN

Dari hasil percobaan dan simulasi penerpaan tegangan impuls pada belitan transformator, diperoleh kesimpulan sebagai berikut :

1. Untuk analisis perilaku belitan transformator terhadap penerpaan tegangan impuls, model rangkain yang paling *representatif* adalah model yang mengikutsertakan nilai kapasitansi dan induktansi belitan serta resistansi yang merepresentasikan rugi inti.
2. Adanya kapasitansi dan induktansi belitan transformator akan menyebabkan tegangan impuls yang diterapkan mengalami osilasi, dan osilasi ini diredam oleh adanya resistansi yang merepresentasikan rugi inti. Semakin kecil nilai resistansi, maka redaman yang diberikan semakin besar.
3. Belitan yang paling dekat dengan terminal transformator akan mendapatkan pembebanan

tegangan yang jauh lebih besar dibandingkan belitan lainnya.

4. Simulasi numerik dengan EMTP dapat dipertimbangkan untuk dipergunakan dalam penentuan tingkat isolasi dasar (TID) suatu transformator.
5. Dalam penentuan TID transformator melalui simulasi numerik, model rangkaian yang hanya mengikutsertakan induktansi dan kapasitansi belitan memberikan hasil yang lebih pesimistik dibandingkan model rangkaian yang mengikutsertakan induktansi dan kapasitansi belitan serta resistansi yang merepresentasikan rugi inti.
6. Bila parameter R yang merepresentasikan rugi-rugi inti tidak diketahui, hasil studi menunjukkan bahwa model rangkaian LC memberikan hasil yang relatif memadai untuk digunakan sebagai model simulasi.

DAFTAR PUSTAKA

- A.S. Morched, L. Marti, R.H. Brierley, J.G. Lackey
“*Analysis of Internal Winding Stress in EHV Generator Step-up Transformer Failure*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp.888-894.
- A.S. Morched, L. Marti, J. Ottevangers, “*A High Frequency Transformer Model for the EMTP*”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 8, No. 3, July 1993, pp.1615-1626.
- “*Electromagnetic Transients Program (EMTP) Application Guide*”, Westinghouse Electric Corporation Power System Planning and Operation Program Electrical System Division, California, 1986.
- Greenwood, A., “*Electrical Transients in Power Systems*”, Second Edition, John Wiley & Sons, Inc., Canada, 1991.
- Hendri, “*Studi Distribusi Tegangan Impuls pada Belitan Transformator*”, Tesis Magister Elektroteknik, ITB, 1999.
- H.W. Dommel, “*Electromagnetic Transients Program Reference Manual (EMTP THEORY BOOK)*”, Printed by The University of British Columbia, Vancouver B.C., Canada, Agustus 1986.
- IEC Publication 60, “*IEC High Voltage Test Techniques*”, The International Electrotechnical Commission, 1977.
- Karsai, K., Kerényi, D., Kiss, L., “*Large Power Transformers*”, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1987.
- S. Austen Stigant, A.C. Franklin, “*The J&P Transformer Book*”, A Practical Technology of the Power Transformer, Newnes-Butterworths, London, 1976.
- SNI 0200-1987-C/SLI 002-1984, “*Transformator Daya*”, Departemen Pertambangan dan Energi, Direktorat Jenderal Listrik dan Energi Baru, 1987.
- W.J. McNutt, et al., “*Response of Transformer Winding to System Transient Voltages*”, IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-93 (2), 1974, pp.475-467.
-

PENINGKATAN UNJUK KERJA DINAMIS SISTEM TENAGA LISTRIK DENGAN MENGGUNAKAN *POWER SYSTEM STABILIZER (PSS)*

Zulfatri Aini¹

Hasbullah²

Abstrak. Penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kinerja dari sebuah pembangkit pada sistem tenaga listrik. Dengan meninjau kurva respon melalui simulasi dengan Matlab dapat diketahui perubahan sudut rotor, osilasi tegangan dan penurunan daya listrik untuk masing-masing pembangkit. Penerapan *Power System Stabilizer (PSS)* sebagai kompensasi untuk meningkatkan unjuk kerja sistem tenaga listrik. Hasil pengamatan menunjukkan bahwa pemasangan *Power System Stabilizer (PSS)* memberikan redaman terhadap waktu osilasi.

Abstract. This research done to know performance from a generator at electrical power system. With evaluating response curve through simulation with knowable Matlab of transformation of angle of rotor, oscillation of strain and derivation of electricity for each generator. Application *Power System Stabilizer (PSS)* as compensation to increase electrical power system work short exchange. Result of reconnaissance indicates that erection *Power System Stabilizer (PSS)* gives damping to oscillation time.

Kata Kunci : Unjuk kerja dinamis, pembangkit tenaga listrik, Matlab, PSS

PENDAHULUAN

Untuk sebuah sistem ketenagaan yang terinterkoneksi, maka strategi pengontrolan pembangkitan dan pengiriman daya diharapkan secara ekonomis dan handal, serta terjaga nilai tegangan dan frekwensinya pada harga yang ditetapkan.

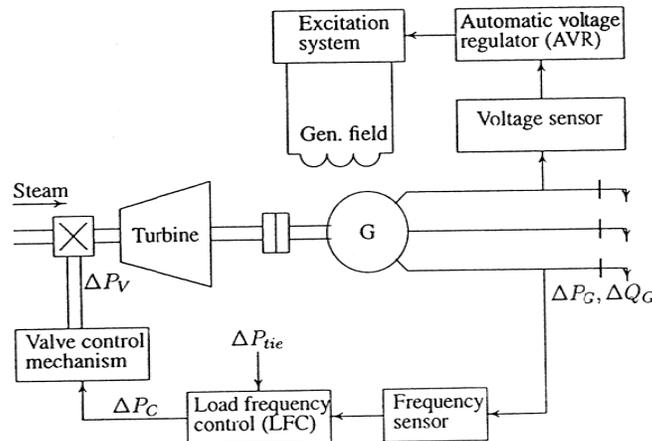
Perubahan daya nyata mempengaruhi frekwensi sistem, sedang daya reaktif tidak mempengaruhi frekwensi tetapi berpengaruh pada nilai tegangan. Sehingga daya nyata dan daya reaktif dipisahkan sistem pengontrolannya. *Load Frequency Control (LFC)* mengontrol daya nyata dan frekwensi, sedang *Automatic Voltage Regulator (AVR)* untuk mengatur daya reaktif dan besaran tegangan. Peranan kedua jenis piranti tersebut yang masuk pada kategori *Automatic Generation Control (AGC)* pada sistem ketenagaan dimaksudkan untuk kontrol daya pada kondisi normal harus dianalisis terlebih dahulu. Bentuk-bentuk tanggapan kebutuhan daya nyata dianalisis dengan teknik simulasi yang tersedia pada *MATLAB*

SIMULINK. Pada akhirnya usaha untuk regulasi tegangan dan daya reaktif, serta pengaruhnya pada stabilitas baik untuk kecepatan dan kontrol eksitasi dengan sinyal umpan balik yang sesuai dapat dihitung.

LANDASAN TEORI

KALANG (*LOOP*) KONTROL GENERATOR

Pada sebuah sistem ketenagaan piranti *LFC* dan *AVR* di pasang pada setiap generator. Lihat gambar.1. Pengontrol-pengontrol ini diatur untuk kondisi operasi tertentu dan menjaga agar tidak terjadi gejala pada perubahan kebutuhan beban, serta menjaga agar frekwensi dan besaran tegangan berada pada nilai yang ditetapkan. Perubahan yang kecil pada daya nyata umumnya tergantung pada perubahan sudut rotor δ demikian juga frekwensinya. Daya reaktif umumnya tergantung pada besaran tegangan (eksitasi generator). Konstanta waktu sistem eksitasi lebih kecil dibandingkan dengan konstanta waktu penggerak mula dan kecuraman *transientnya* lebih cepat.



Gambar.1 Diagram skematik LFC dan AVR

¹ Zulfatri Aini adalah Dosen Jurusan Teknik Elektro Institut Teknologi Padang

² Hasbullah adalah dosen pada Jurusan Pendidikan Teknik Elektro UPI

a. Model Generator

Penerapan persamaan ayunan sebuah mesin sinkron dengan gangguan kecil diberikan persamaan (1):

$$\frac{2H}{\omega_s} \frac{d^2 \Delta\delta}{dt^2} = \Delta P_m - \Delta P_e \tag{1}$$

atau dalam bentuk penyimpangan kecil kecepatan :

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \tag{2}$$

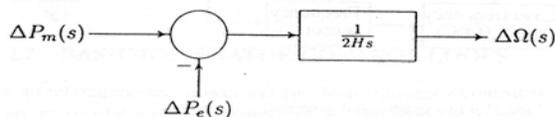
kecepatan dalam per unit, tanpa eksplisit notasi per unit :

$$\frac{d\Delta\omega}{dt} = \frac{1}{2H} (\Delta P_m - \Delta P_e) \tag{3}$$

maka transformasi Laplace dari persamaan (3) adalah :

$$\Delta\Omega(s) = \frac{1}{2Hs} [\Delta P_m(s) - \Delta P_e(s)] \tag{4}$$

dari hubungan beberapa persamaan, didapatkan blok diagram dalam gambar.2.



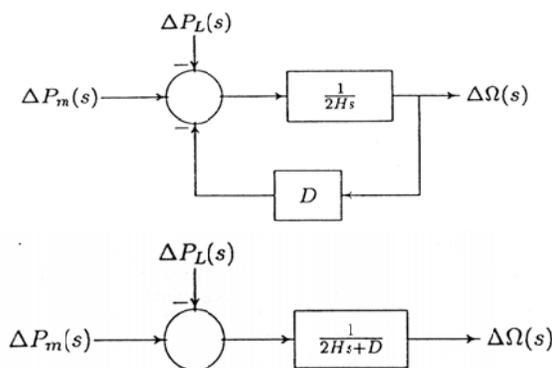
Gambar.2 Diagram Blok Generator

b. Model Beban

Beban pada sebuah sistem ketenagaan terdiri dari berbagai piranti listrik, misalnya beban resistif, (misalnya : penerangan dan pemanas yang daya listriknya tidak bergantung frekwensi). Untuk beban berupa motor, bersifat sensitif terhadap perubahan frekwensi. Seberapa besar sensitifitas terhadap perubahan frekwensi tergantung kepada komposisi karakteristik kecepatan beban dari keseluruhan piranti-piranti penggerak. Karakteristik beban ini dituliskan dengan persamaan :

$$\Delta P_e = \Delta P_L + D\Delta\omega \tag{5}$$

ΔP_L adalah perubahan beban tanpa memperhatikan frekwensi dan $D\Delta\omega$ adalah perubahan beban yang sensitif terhadap frekwensi. D menggambarkan persentase perubahan beban dibagi dengan persentase perubahan frekwensi (sebagai contoh bila beban berubah 1.6 persen, untuk perubahan frekwensi 1 persen maka nilai $D=1.6$)

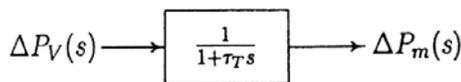


Gambar.3 Diagram blok generator dan beban

c. Model Penggerak Mula

Sumber untuk daya mekanis biasa disebut dengan penggerak mula, dapat berupa turbin air dari sebuah air terjun, turbin uap, dengan energinya dapat berasal dari pembakaran batu bara, gas, bahan bakar nuklir atau gas. Model untuk turbin berhubungan dengan perubahan daya mekanis keluaran ΔP_m ke perubahan posisi katup uap ΔP_v . Berbagai tipe turbin memberikan karakteristik yang bervariasi pula. Contoh diagram blok sederhana untuk sebuah turbin yang tidak dipanas ulang adalah seperti gambar.4 dengan konstanta waktu τ_T dan fungsi alih sebagai :

$$G_T(s) = \frac{\Delta P_m(s)}{\Delta P_v(s)} = \frac{1}{1 + \tau_T s} \tag{6}$$



Gambar 4. Diagram blok untuk turbin uap tidak dipanas ulang

d. Model Governor

Bila beban kelistrikan generator tiba-tiba naik, akan mempengaruhi daya mekanis masukan. Daya ini disuplai oleh tenaga kinetis yang disimpan dalam sistem yang berotasi. Pengurangan energi kinetis menyebabkan kecepatan turbin, demikian juga frekwensi generator akan turun. Perubahan kecepatan ini dirasakan oleh governor yang akan beraksi mengatur katup masukan turbin untuk mengubah daya keluaran mekanis dan membawa kecepatan pada kondisi tunak (*steady state*).

Kecepatan mekanis governor bekerja sebagai komperator dengan keluaran ΔP_g , yang merupakan

selisih antara daya acuan ΔP_{ref} dan daya $\frac{1}{R} \Delta\omega$

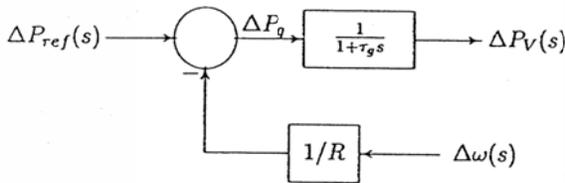
dalam persamaan (7), dalam kawasan S dalam persamaan (8) :

$$\Delta P_g = \Delta P_{ref} - \frac{1}{R} \Delta \omega \quad (7)$$

$$\Delta P_g(s) = \Delta P_{ref}(s) - \frac{1}{R} \Delta \Omega(s) \quad (8)$$

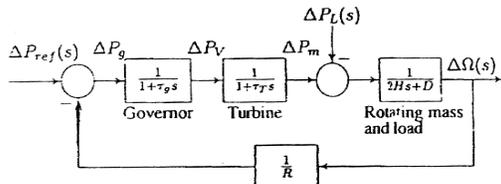
ΔP_g adalah ditransformasikan melalui penguat hidrolis ke posisi katup turbin uap ΔP_v , misalkan hubungan linear dengan konstanta waktu τ_g , maka hubungan dalam kawasan s :

$$\Delta P_V(s) = \frac{1}{1 + \tau_g s} \Delta P_g(s) \quad (9)$$



Gambar 5. Diagram blok sistem kecepatan governor

Persamaan (8) dan (9), digambarkan dengan diagram blok Gambar.5. Kombinasi Gambar.3, 4, dan 5, menghasilkan diagram blok sebagai pada Gambar.6.

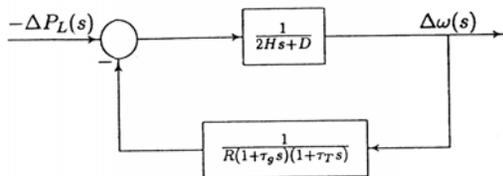


Gambar 6. Diagram blok LFC sistem tenaga terpisah

$$KG(s)H(s) = \frac{1}{R} \frac{1}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)} \quad (10)$$

$$\frac{\Delta \Omega(s)}{-\Delta P_L(s)} = \frac{(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s)}{(2Hs + D)(1 + \tau_g s)(1 + \tau_T s) + 1/R} \quad (11)$$

$$\Delta \Omega(s) = -\Delta P_L(s) F(s) \quad (12)$$



Gambar 7. Diagram blok LFC dengan input $\Delta P_L(s)$ dan output $\Delta \Omega(s)$

Pergantian beban sebuah dengan masukan berupa step $\Delta P_L(s) = \Delta P_L/s$, nilai *steady state* untuk $\Delta \omega$ adalah :

$$\Delta \omega_{ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s \Delta \Omega(s) = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + 1/R} \quad (13)$$

Terlihat dengan nyata untuk kasus beban yang tidak sensitif terhadap frekwensi ($D=0$), maka deviasi frekwensi *steady state* ditentukan oleh regulasi kecepatan governor sebagai :

$$\Delta \omega_{ss} = (-\Delta P_L) R \quad (14)$$

Bila beberapa generator dengan regulasi kecepatan governor R_1, R_2, \dots, R_n dihubungkan ke sistem maka frekwensi deviasi *steady state* ditulis sebagai :

$$\Delta \omega_{ss} = (-\Delta P_L) \frac{1}{D + 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_n} \quad (15)$$

KONTROL GENERATOR OTOMATIS

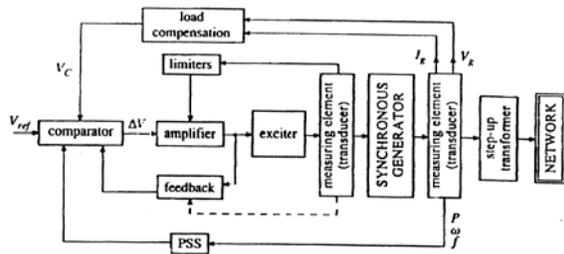
Untuk sebuah sistem tenaga maka sistem eksitasi sangat berperan untuk pengaturan tegangan dan stabilitas sistem. Sistem eksitasi ini harus mampu merespon gangguan secara cepat. Tiga bagian pokok sistem kontrol yang mempengaruhi generator sinkron adalah boiler, *governor* dan kontrol *exciter*.

Exciter adalah sebuah generator dc yang digerakan oleh turbin uap (dengan poros yang sama dengan generator) atau motor induksi. Pengembangan berikutnya *exciter* berupa sistem *solid state* yang terdiri dari beberapa *rectifier* atau *thyristor* yang disuplai dari bus tegangan bolak-balik.

Regulator tegangan adalah sebuah sistem cerdas yang mengontrol keluaran *exciter*, sehingga tegangan yang dibangkitkan dan daya reaktif berubah sesuai dengan yang diinginkan. Untuk sistem yang paling modern, maka *Automatic Voltage Regulator (AVR)* adalah sebuah pengontrol yang dapat merasakan tegangan keluaran generator (dan arus). Sekaligus memberikan koreksi/perbaikan, dengan mengatur *exciter* untuk kondisi yang diinginkan.

Kecepatan *AVR* adalah hal yang paling menarik dalam pembahasan stabilitas. Hal yang sulit adalah mengubah arus medan karena nilai induktansi yang besar pada belitan medan generator. *AVR* mengatur tegangan terminal generator dengan mengendalikan sejumlah arus yang disuplai ke belitan medan generator.

Diagram blok *AVR* terlihat sebagai gambar 8.



Gambar 8. Diagram blok sistem sistem eksitasi dan AVR

Tegangan terminal generator yang terukur V_g dikompensasi oleh arus beban I_g dan dibandingkan dengan tegangan acuan yang diinginkan V_{ref} dan memberikan tegangan error ΔV . Error ini kemudian dikuatkan (*amplified*) dan dipakai untuk menentukan keluaran *exciter*. Digambarkan sebagai kalang tertutup. Proses regulasi ini distabilisasikan memakai kalang umpan balik negatif yang diambil langsung dari *amplifier* atau *exciter*.

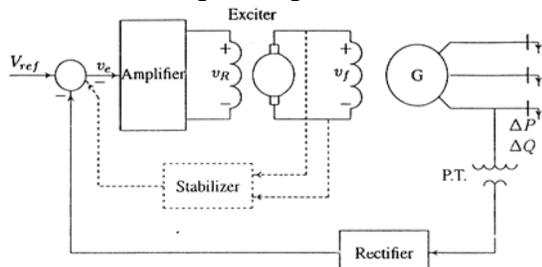
Sebuah PSS kadang-kadang ditambahkan ke subsistem AVR untuk membantu menahan ayunan daya pada sistem. PSS berupa elemen pembanding dengan penggeser fase. Sinyal inputnya dimungkinkan sebanding dengan kecepatan rotor, frekwensi keluaran generator atau daya nyata keluaran generator.

a. Model Penguatan (Amplifier)

Sistem penguatan untuk eksitasi mungkin berupa penguatan magnetis (*magnetic amplifier*), penguatan roda gigi (*rotating amplifier*) ataupun secara elektronis. Penguatan ini digambarkan dengan *gain* K_A dan konstanta waktu τ_A . Fungsi alihnya

$$\frac{V_R(s)}{V_e(s)} = \frac{K_A}{1 + \tau_A s} \tag{16}$$

Nilai K_A sekitar 10 sampai 400 . Konstanta waktu penguatan τ_A sangat kecil antara 0,02 sampai 0,1 detik, bahkan kadang-kadang diabaikan.



Gambar 9. Konstruksi sederhana sebuah AVR

b. Model Exciter

Ada berbagai tipe eksitasi yang berbeda. Eksitasi yang modern menggunakan sumber daya ac melalui penyearah *solid state* seperti SCR. Tegangan keluaran *exciter* merupakan fungsi non linear dari

tegangan medan karena efek saturasi dari tranckaian magnet. Sehingga hubungan antara tegangan terminal dengan tegangan medan *exciter* tidak sederhana. Banyak model yang dikembangkan dan memenuhi rekomendasi IEEE. Model yang masuk akal untuk *exciter* modern adalah model yang dilinearakan yang mengabaikan saturasi ataupun ketidak linearan yang lain. Dalam bentuk paling sederhana fungsi alih dalam *exciter* modern dinyatakan dengan satu konstanta waktu τ_E dan *gain* K_E . Konstanta waktu untuk *exciter* modern sangat kecil

Fungsi alihnya :

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \tag{17}$$

c. Model Generator

Emf yang dibangkitkan oleh sebuah mesin sinkron merupakan fungsi dari kurva magnetisasi mesin. Tegangan terminalnya tergantung pada beban generator. Untuk model yang dilinearakan fungsi transfer menghubungkan tegangan terminal generator dengan tegangan medan yang dapat dinyatakan oleh *gain* K_G dan konstanta waktu τ_G , dan fungsi alihnya :

$$\frac{V_t(s)}{V_F(s)} = \frac{K_G}{1 + \tau_G s} \tag{18}$$

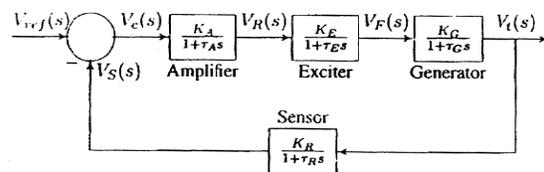
Konstanta untuk *gain* K_G tergantung nilai beban sekitar 0,7 sampai 1 dan konstanta waktu τ_G antara 1,0 dan 2,0 detik dari beban penuh sampai tanpa beban.

d. Model Sensor

Tegangan dirasakan lewat *potential transformer* dan disearahkan melalui penyearah jembatan (*bridged rectifier*). Sensor ini dimodelkan oleh fungsi alih sederhana ber-orde satu sebagai :

$$\frac{V_S(s)}{V_t(s)} = \frac{KR}{1 + \tau_R s} \tag{19}$$

τ_R nilainya sangat kecil dan boleh diasumsikan antara daerah 0,01 sampai 0,06 detik. Pemodelan konstuksi AVR dari Gambar.9 dapat dibuat diagram blok AVR tergambar pada Gambar.10.



Gambar 10. Blok diagram AVR

Fungsi alih untuk kalang terbuka dari Gambar.10 di atas adalah :

$$KG(s)H(s) = \frac{K_A K_E K_G K_R}{(1 + \tau_R s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s)} \quad (20)$$

Sedang fungsi alih untuk kalang tertutup berhubungan dengan tegangan terminal $V_t(s)$ dan tegangan acuan $V_{ref}(s)$ adalah :

$$\frac{V_t(s)}{V_{ref}(s)} = \frac{K_A K_E K_G K_R (1 + \tau_R s)}{(1 + \tau_R s)(1 + \tau_E s)(1 + \tau_G s)(1 + \tau_R s) + K_A K_E K_G K_R} \quad (21)$$

atau :

$$V_t(s) = T(s) V_{ref}(s) \quad (22)$$

Untuk masukan berupa fungsi step $V_{ref}(s) = \frac{1}{s}$, berdasar persamaan (22) maka respon keadaan tunak (*steady state*) adalah :

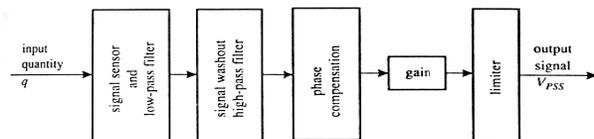
$$V_{t,ss} = \lim_{s \rightarrow 0} s V_t(s) = \frac{K_A}{1 + K_A} \quad (23)$$

PENINGKATAN STABILITAS

Stabilitas sistem ketenagaan dapat ditingkatkan, demikian juga respon dinamisnya dengan cara memperbaiki desain dan operasi sistem antara lain :

1. Memakai peralatan proteksi dan pemutus arus yang meyakinkan dalam kecepatan pemutusan gangguan.
2. Pemakaian konfigurasi yang sesuai untuk kondisi operasi tertentu (beban yang berat, jaringan transmisi yang rumit).
3. Menghindari operasi sistem pada frekwensi dan / atau tegangan rendah.
4. Mengindari jaringan yang lemah oleh banyaknya jumlah cabang dan transformator.

Resiko untuk hilangnya stabilitas dapat dikurangi dengan menggunakan elemen tambahan dalam sistem untuk memperhalus respon dinamisnya. Antara lain dengan memakai PSS. Elemen-elemen PSS secara umum dapat dilihat pada Gambar.11.



Gambar 11. Elemen dasar sebuah PSS

Bentuk-bentuk besaran yang diukur sebagai sinyal masukan ke PSS adalah deviasi kecepatan rotor, daya aktif generator, atau frekwensi tegangan terminal generator. Ada beberapa kemungkinan konstruksi PSS, tergantung pada sinyal yang dipilih :

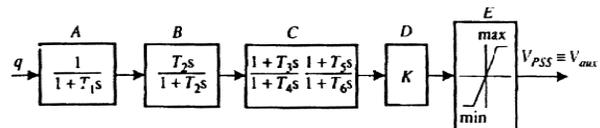
1. PSS berdasarkan pada $\Delta\omega$
2. PSS berdasarkan pada $\Delta\omega$ dan P_e
3. PSS berdasarkan pada P_e
4. PSS berdasarkan f_{pg} dan f_e

a. Desain PSS

Untuk mendisain dan menerapkan PSS tidak sederhana, dan membutuhkan analisis struktur dan parameter regulator. Desain PSS yang buruk akan menimbulkan sumber sebagai osilasi yang tidak diinginkan. Parameter-parameter PSS biasanya dioptimalkan, perhatiannya pada peredaman dari ayunan gangguan daya yang kecil. Desain PSS yang tepat juga meningkatkan redaman terhadap kondisi gangguan yang besar.

Dalam rangka meningkatkan stabilitas *transient* ayunan pertama maka dapat ditambahkan sebuah loop kontrol pada PSS, yang bekerja dengan cara yang sama untuk eksitasi pada sistem AVR elektro mekanis yang kuno. Solusi ini dijelaskan oleh Lee dan Kundur 1986 dan Kundur 1994. Elemen tambahan adalah sebuah *relay* atau *switch* yang paralel dengan PSS. Elemen ini akan terbuka bila ada sinyal akibat perubahan kecepatan. Diagram blok untuk model PSS yang sesuai untuk Gambar. 11 adalah sebagai Gambar.12.

Sebagai sinyal masukan q yang kemungkinan berupa kecepatan rotor, daya *real*, frekwensi, atau sinyal-sinyal lain seperti yang telah dijelaskan pada dasar PSS. Sinyal keluaran adalah P_{PSS} yang dilewatkan ke AVR sebagai sinyal V_{aux} .



Gambar 12. Diagram blok PSS

Fungsi Alih PSS dapat disusun sebagai berikut

:

$$G_{PSS} = \frac{K_o \tau_2 s}{1 + \tau_2 s} \left[\left(\frac{1 + \tau_3 s}{1 + \tau_4 s} \right) \left(\frac{1 + \tau_5 s}{1 + \tau_6 s} \right) \right] \quad (24)$$

Untuk kondisi kasus-kasus praktis, maka untuk rangkaian fase *lead* diinginkan lebih besar dari pada rangkaian *single lead*. Untuk dua atau lebih tingkat (*cascade lead*), maka persamaan umum sebagai berikut :

$$G_{PSS} = \frac{K_o \tau_o s}{1 + \tau_o s} \left[\left(\frac{1 + a\tau\tau}{1 + \tau s} \right) \right]^n \quad (25)$$

n adalah jumlah tingkat (biasanya $n=2$ atau 3).

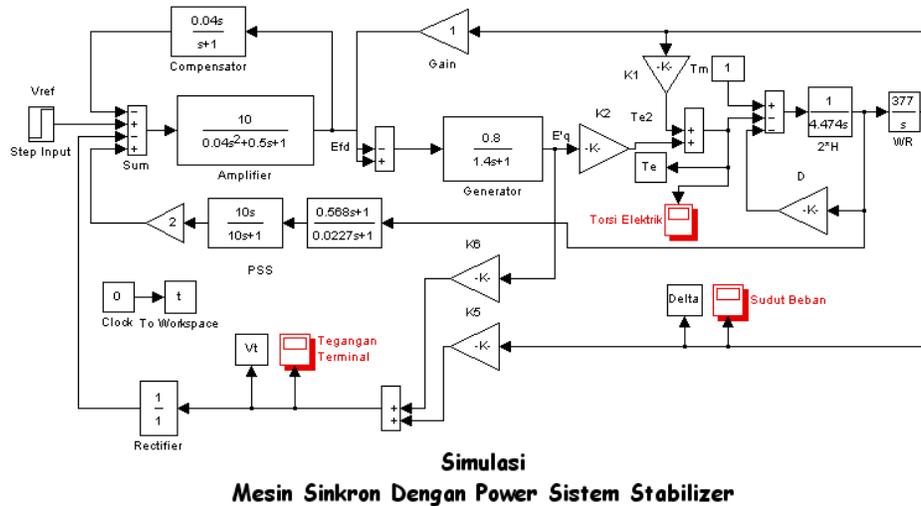
dengan :

$$a = (1 + \sin \phi_m) / (1 - \sin \phi_m) \tag{26}$$

dan :

$$\tau = \frac{1}{\omega_m \sqrt{a}} \tag{27}$$

2. SIMULASI DAN ANALISIS



Gambar 13. Digram blok simulasi dengan MATLAB

Parameter-parameter yang ditetapkan untuk stasiun ketenagaan listrik sebagai berikut :

Gain	Konstanta Waktu
Governor	$K_g = 1$ $\tau_g = 0.2$
Amplifier	$K_A = 10$ $\tau_A = 0.1$
Exciter	$K_E = 1$ $\tau_E = 0.4$
Generator	$K_G = 0.8$ $\tau_G = 1.4$
Sensor	$K_R = 1$ $\tau_R = 0.05$
Inersia	$H = 2,237$
Regulasi	$R = 0.05$
Kompensator	

Dimisalkan nilai $\omega_m = 8,8$ rad/detik, dan nilai a diambil = 25, maka berdasarkan persamaan (26) dan (27), harga $\tau = 0,0227$, harga $K = 10$, dan harga $a \cdot \tau =$

6,568. Untuk diterapkan pada diagram blok dari pada PSS.

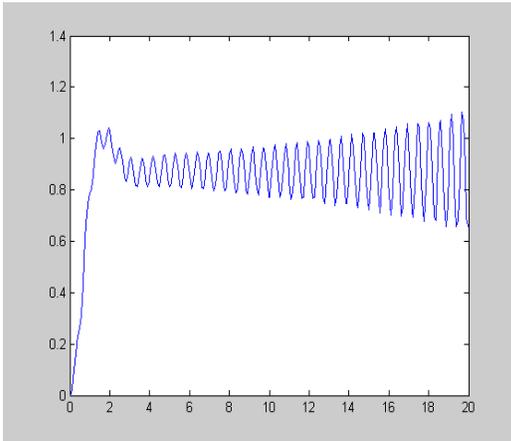
Dengan memanfaatkan MATLAB SIMULINK, serta menetapkan nilai gain=2 dan gain=7 pada PSS maka diperoleh grafik tegangan terminal generator (V_t), Torsi elektrik (T_e) dan sudut beban, tanpa PSS maupun dengan PSS terlihat pada Gambar.14. Ternyata penetapan gain mempengaruhi nilai-nilai parameter kestabilan sistem. Sehingga penetapan gain harus diperhitungkan dengan baik.

KESIMPULAN

Dalam suatu sistem ketenagaan, besar beban senantiasa berubah tergantung pada kebutuhan konsumen, sehingga mempengaruhi kestabilan sistem. Perubahan tersebut menyebabkan terjadinya perubahan terhadap tegangan terminal generator (V_t), Torsi elektrik (T_e) dan sudut beban.

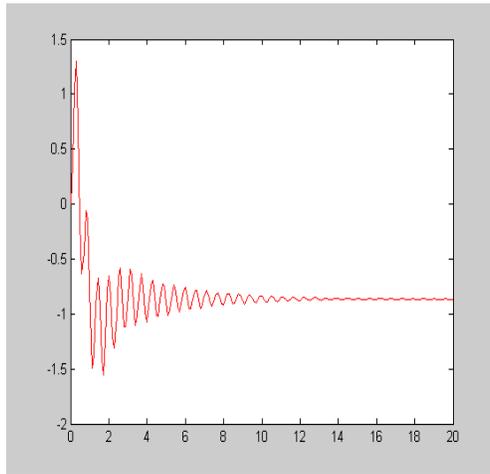
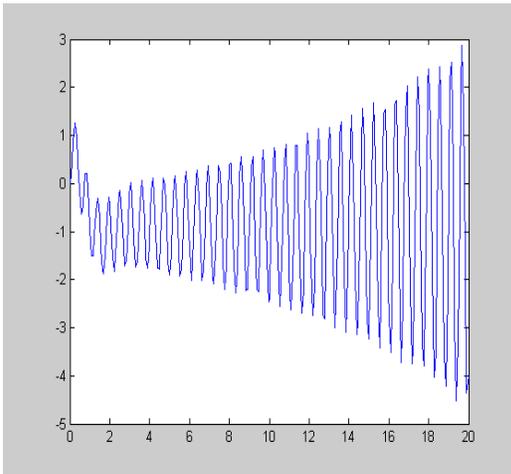
Terlihat jelas penetapan gain berpengaruh terhadap bentuk keluran dari sistem. Sehingga desain PSS sangat menentukan baik buruknya sistem sesuai

dengan penjelasan pada halaman 11. Desain PSS yang tepat akan meningkatkan redaman terhadap gangguan.

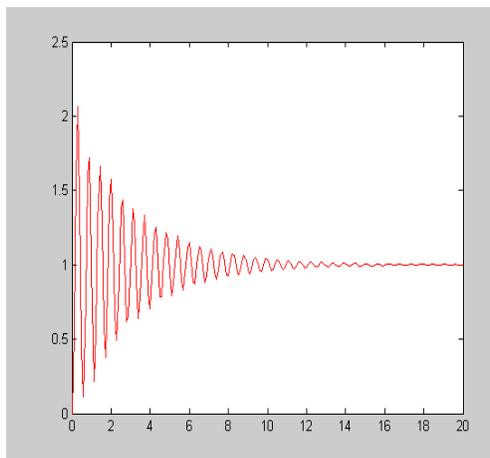
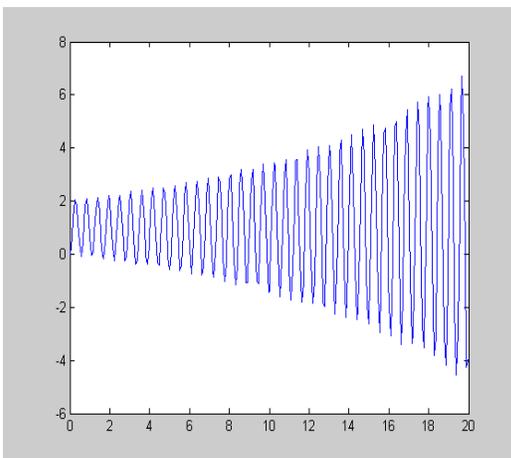


Dengan gain = 2

a. Grafik keluaran tegangan (V_t)



b. Grafik keluaran sudut beban



c. Grafik keluaran torsi listrik (T_e)

Gambar.14 Grafik keluaran untuk tegangan(V_t),sudut beban, torsi listrik (T_e)

DAFTAR PUSTAKA

- Anderson, P.M., and Fouad, A.A. (1997), *Power System Control and Stability*, Iowa State University.
- Costa, A.D.D.R., Valle, A.C.M.d., Maraes, A.J.d., and Azevedo, H.r.d, A (2001) *Simple Fuzzy Excitation Control System (AVR) In Power System Stability Analysis*, Federal University of Uberlandia, Electrical Engineering Faculty.
- Machowski, J., Bialek, J.W., and Bumby, J.R., (1997) *Power System Dynamics and Stability*, Jhon Wiley & Son, 1997.
- Senobua, Y.O., Hariyanto, N., and Nurdin.M., (2000) *Koordinasi PSS dan FDS Untuk Meningkatkan Unjuk Kerja Dinamik Sistem Tenaga Listrik, Proceedings*, Seminar Sistem Tenaga Elektrik-I, ITB.
- Saadat,H, (1999) *Power System Analysis*, McGraw-Hill.
-

