

PEMODELAN DAN PENGENDALIAN MOTOR LISTRIK

Ruslan L¹⁾

Abstrak: Penelitian ini bertujuan untuk mengatur kecepatan motor dc shunt dengan menggunakan pengaturan tegangan pada terminal jangkar kumparan motor dc melalui pengaturan sudut penyalaaan (alpha) penyearah terkendali. Pengaturan sudut penyalaaan diperoleh dari umpan balik kecepatan motor dan arus jangkar motor dc. Pemodelan dan Pengaturan disimulasikan dalam Simulink Matlab. Analisis yang dilakukan terdiri atas pemodelan simulasi pengasutan motor tanpa pengendali dan dengan pengendali tegangan jangkar pada terminal jangkar motor melalui pengaturan sudut penyalaaan alpha penyearah terkendali dengan berbagai perubahan beban atau adanya gangguan beban sesaat, sehingga kecepatan motor terganggu dan dapat distabilkan pada kecepatan nominal. Hasil yang diperoleh adalah arus start dengan pengaturan tegangan terminal jangkar akan lebih baik dari pada pengasutan tanpa pengendali dan kecepatan motor dapat distabilkan pada kecepatan nominal meskipun mengalami perubahan beban atau adanya gangguan beban sesaat.

Kata Kunci: Simulink Matlab, kecepatan, motor DC.

I. PENDAHULUAN

Perkembangan industri yang semakin pesat tidak lepas dari penggunaan motor listrik sebagai tenaga penggerak. Peranan motor listrik semakin besar seiring dengan semakin tingginya kuantitas pemakaiannya. Untuk memaksi-malkan penggunaan motor listrik pada berbagai fungsi yang disesuaikan dengan kebutuhan peralatan yang digerakkannya, maka dibutuhkan pengaturan kerja motor, misalnya pengaturan kecepatannya.

Ditinjau dari segi medan berputar dan kecepatan tetap, mesin-mesin dc pada umumnya jauh lebih sesuai untuk keperluan yang kecepatannya dapat diatur dibandingkan dengan mesin-mesin ac. Alasan utama mengapa pilihan jatuh pada mesin dc dalam industri modern adalah karena kecepatan kerja motor-motor dc mudah diatur dalam suatu rentang kecepatan yang lebar, disamping banyaknya metode yang dapat digunakan.

Pengaturan kecepatan memegang peranan penting dalam motor arus searah, karena motor arus searah mempunyai karakteristik kopel-kecepatan yang menguntungkan dibandingkan dengan motor lainnya. Telah diketahui bahwa untuk motor arus searah dapat diturunkan persamaan sebagai berikut:

¹ Staf Pengajar Jurusan Teknik Elektronika Politeknik Negeri Ujung Pandang

$$n = \frac{V_t - I_a \cdot R_a}{C \cdot \Phi} \quad (1)$$

dengan :

Φ	= $f(I_f)$ = fluks medan (Weber)
V_t	=Tegangan input (Volt)
I_a	=Arus jangkar (Ampere)
R_a	=Tahanan jangkar (Ohm)
C	= konstanta

Berdasarkan persamaan 1 di atas dapat dilihat bahwa putaran n dapat diatur dengan mengubah-ubah besaran fluks Φ , tahanan jangkar R dan tegangan terminal input V_t .

Pengendalian dengan perubahan tegangan input V_t mempunyai batasan yang lebih lebar dibanding pengendalian besaran lainnya. Cara ini dapat menghasilkan pengendalian putaran motor yang halus. Ada beberapa cara untuk mengendalikan kecepatan motor arus searah yakni : Pengendalian fluks medan (Φ), Pengendalian tahanan jangkar (R_a), Pengendalian tegangan terminal input (V_t)

Pada penelitian ini akan dibuat simulasi pengaturan kecepatan motor dc shunt dengan menggunakan simulink dari Matlab. Metode yang digunakan adalah mengatur tegangan pada terminal jangkar kumparan motor dc yang dihubungkan rangkaian konverter dc.

A. Motor DC

Motor arus searah (dc=direct current motor) adalah suatu komponen atau peralatan yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik. Energi mekanik yang dihasilkan berupa Kecepatan putar digunakan untuk memutar peralatan produksi di pabrik ataupun di industri. Konstruksi motor dc terbagi atas 3 bagian, yaitu:

- Stator yaitu bagian mesin yang diam
- Rotor atau jangkar adalah bagian mesin yang berputar
- Celah udara adalah ruangan yang antara stator dan jangkar

B. Jenis-jenis Motor DC

Berdasarkan sumber arus penguat magnetnya, motor dc dibedakan atas:

- Motor dc penguat terpisah
- Motor dc penguat sendiri

Berdasarkan hubungan lilitan penguat magnet terhadap lilitan jangkar, motor dc penguat sendiri dibedakan atas:

- Motor dc shunt
- Motor dc seri
- Motor dc kompon

II. METODE PENELITIAN

A. Pemodelan Motor DC Shunt

Untuk memudahkan analisis sistem kontrol motor dc dibuat pemodelan matematik dengan menentukan fungsi alih antara output terhadap input motor dengan sistem loop terbuka (open loop system) dan loop tertutup dengan system umpan balik (close loop with feed back system) Gambar 1 adalah pemodelan rangkaian ekivalen motor dc shunt

Persamaan ekivalen pada rangkaian jangkar adalah:

$$V_t = I_a \cdot R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a$$

$$V_t = V_{dc} - V_{sikat} \quad (2)$$

dengan:

V_t = tegangan jangkar (V)

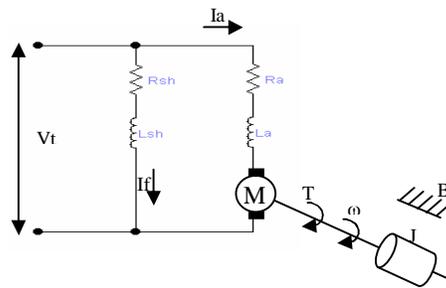
I_a = arus jangkar (A)

R_a = resistansi jangkar (Ω)

L_a = Induktansi jangkar (H)

E_a = Emf balik (V)

V_{sikat} = tegangan sikat (V)



Gambar 1. Rangkaian ekivalen motor dc shunt

Hubungan antara torsi motor, torsi beban, dan momen inersia adalah:

$$T_m - T_B - B \cdot \omega = J \frac{d\omega_m}{dt} \quad (3)$$

dengan,

T_m = torsi mekanik (N.m)

T_B = torsi beban (N.m)

B = tetapan friksi (N.m.s)

ω = kecepatan motor (rad/sec)

J = momen inersia (kg.m²)

B. Pemodelan Motor DC Shunt dengan Pengasutan Langsung

Pengasutan motor dc shunt dengan system Direct On Line adalah pengasutan dengan cara menghubungkan langsung ke sumber tegangan tanpa menggunakan alat pengasut. Pada percobaan ini, kecepatan motor dc shunt diatur dengan pengontrolan arus jangkar (I_a), sedangkan arus medan (I_f) dijaga konstan, sehingga persamaan torsi motor adalah:

$$T_m = K_m \cdot I_a \quad (4)$$

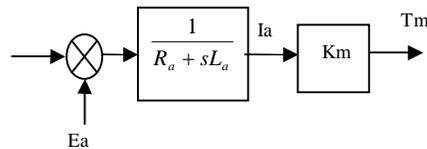
Hubungan antara arus jangkar dengan dengan tegangan terminal motor

$$V_t(t) = I_a(t) \cdot R_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_a(t)$$

$$V_t(s) = R_a \cdot I_a(s) + sL_a \cdot I_a(s) + E_a(s)$$

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - E_a(s)}{R_a + sL_a} \quad (5)$$

Dari persamaan di atas, dapat dibuat diagram blok berikut ini:



Gambar 2. Diagram blok motor dc Terhadap torsi dengan pengontrolan jangkar

E_a adalah Emf balik yaitu tegangan saat jangkar atau rotor berputar. Persamaan E_a adalah:

$$E_a = K_a \cdot \phi \cdot \omega_m \quad (6)$$

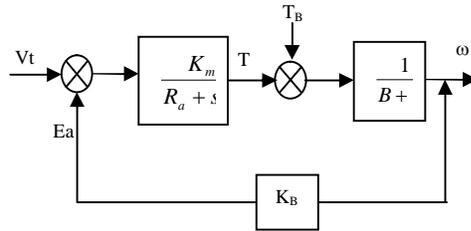
$$E_a = K_B \cdot \omega_m$$

dengan K_B adalah konstanta Emf balik. Dengan demikian, arus jangkar dan kecepatan motor dc adalah:

$$I_a(s) = \frac{V_t(s) - K_B \cdot \omega(s)}{R_a + sL_a} \quad (7)$$

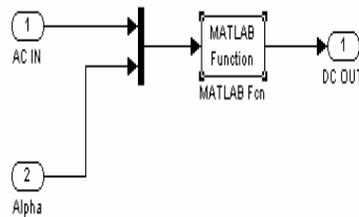
$$\omega = \frac{T_m - T_B}{B + sJ} \quad (8)$$

Diagram blok motor dc shunt dengan pengontrolan jangkar adalah:



Gambar 3. Diagram blok motor dc dengan Pengontrolan jangkar terhadap kecepatan

Salah satu cara yang digunakan untuk pengendalian kecepatan motor DC adalah pengendalian tegangan terminal input (V_t). Pengendalian dengan perubahan tegangan input mempunyai batasan yang lebih lebar dibanding pengendalian besaran lainnya. Cara ini dapat menghasilkan pengendalian putaran motor yang halus. Pengendalian tegangan terminal dapat dilakukan dengan beberapa cara antara pengaturan langsung tegangan masukan, pengaturan tegangan dengan tahanan, dan pengaturan tegangan dengan penyearah gelombang penuh terkendali. Cara yang digunakan pada simulasi ini adalah dengan penyearah gelombang penuh 1 fasa terkendali, yaitu pengaturan sudut penyalan alpha thyristor dengan umpan balik arus jangkar dan kecepatan motor yang dibandingkan dengan referensi kecepatan nominal motor. Simulasi penyearah gelombang penuh terkendali ditunjukkan pada gambar 4. terdiri dari tegangan masukan rms (V_{ac}) dan sudut penyalan alpha.



Gambar 4. Diagram simulasi pengendali terkendali

Untuk menghasilkan tegangan dc keluaran dihasilkan dari persamaan sebagai berikut :

$$V_{dc} = \frac{V_m}{\pi} (1 + \cos \alpha) \quad (9)$$

Sehingga program M.File ditulis sebagai berikut:

```

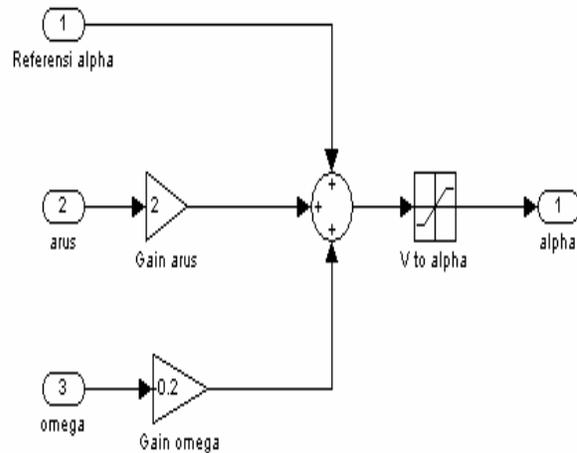
% Program untuk penyearah terkendali
function y = penyearah_terkendali (x)
Vrms = x(1); %Tegangan AC Rms
alpha = x(2); %Sudut penyalaaan alpha
Vm = Vrms*sqrt(2); %Tegangan maksimum
%penyearah 1 fasa gelombang penuh 4 keadaan
if alpha <= pi; %Tegangan jangkar positif
    y = (Vm/pi)*(1 + cos(alpha));
else
    y = -(Vm/pi)*(1 + cos(alpha));
end
    
```

Pengendalian sudut penyalaaan alpha dapat diperoleh dari umpan balik arus jangkar, Kecepatan referensi, dan kecepatan nominal motor. Program M-File untuk perubahan kecepatan RPM ke alpha ditulis sebagai berikut:

```

%Program mengubah Rpm ke alpha
function y = Rpm2alpha (x)
Rpm = x; %Rpm referensi
y = (pi/2500)*Rpm + pi;
end
    
```

Simulasi pengendali sebagai pengubah arus, kecepatan motor ke bentuk sudut penyalaaan alpha dituniukkan pada gambar 5.



Gambar 5. Simulasi Pengendali sudut penyalaaan alpha

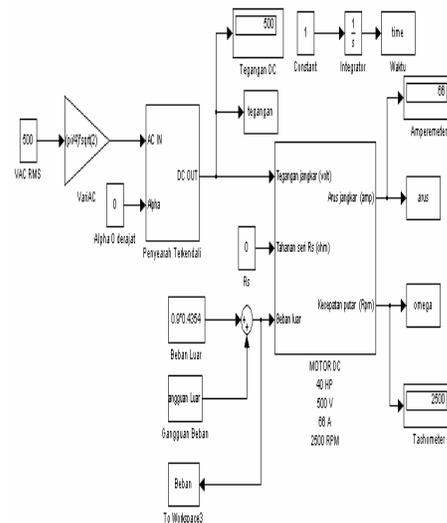
III. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Spesifikasi Motor DC

- Daya, P : 40 HP
- Kecepatan, ω_{nom} : 2500 RPM
 ω_{max} : 3000 RPM
- Teg. jangkar, E_a : 500 Volt
- Arus jangkar, I_a : 66 A
- Tahanan jangkar, R_a : 0.25 Ω
- Indukt. jangkar, L_a : 0.008 H
- Momen Inersia, J : 0.2089 Kgm^3/rad
- Torsi, T_{nom} : 113,894 $N.m/rad$
- Konst. motor, K_m : 1,7271 $N.m/A$
- Beban, B : 0.4354 $N.m.sec/rad$
- Konst. gen, K_B = 1,8469 $V.sec/rad$

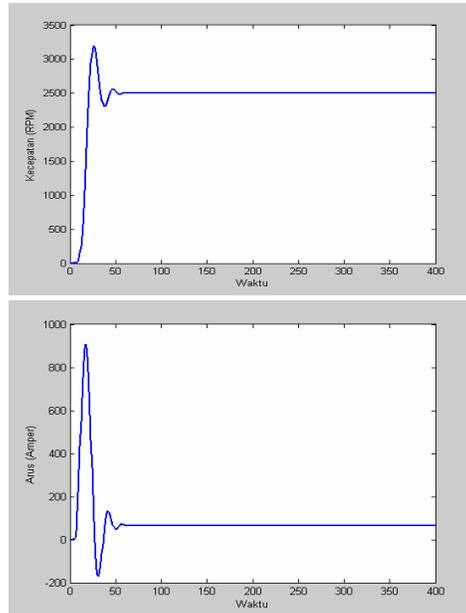
B. Simulasi Loop Terbuka

Simulasi loop terbuka motor dc adalah simulasi menjalankan motor dc tanpa menggunakan pengendalian arus dan kecepatan, Pada simulasi ini, jangkar motor dihubungkan langsung dengan sumber tegangan dc (penyearah terkendali untuk $\alpha=0$) . Model simulasinya diperlihatkan pada gambar 6 dan hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 7.



Gambar 6. Model Simulink untuk Simulasi motor dc shunt sistem hubungan langsung

Hasil simulasi gambar 7 menunjukkan bahwa terjadi osilasi. Saat motor dijalankan. Agar dapat mengurangi osilasi yang terjadi maka harus menggunakan tambahan tahanan seri yang dipasang pada Terminal jangkar motor



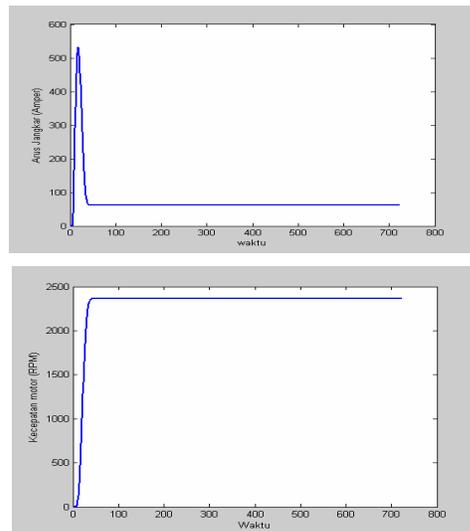
Gambar 7. Simulasi simulink motor dc loop terbuka ($R_s=0$)

Jika diinginkan agar nisbah redaman (damping ratio) motor sebesar $\xi = 1$, maka tambahan tahanan seri dapat dihitung dengan persamaan :

$$2\xi\omega_n = \frac{B.La + Ra.J}{La.J} \quad (10)$$

Dengan nilai komponen pada persamaan 10 sesuai spesifikasi motor dc yang digunakan. Nilai $\omega_n = 44,4276$, sehingga diperoleh tambahan tahanan jangkar total sebesar $R_a \text{ total} = 0,6942 \text{ ohm}$. Besarnya nilai tambahan tahanan seri sebesar :
 $R_s = 0,6942 - R_a$
 $R_s = 0,6942 - 0,25 = 0,44 \text{ ohm}$

Hasil simulasi dengan tambahan tahanan seri R_s ditunjukkan pada gambar 8.



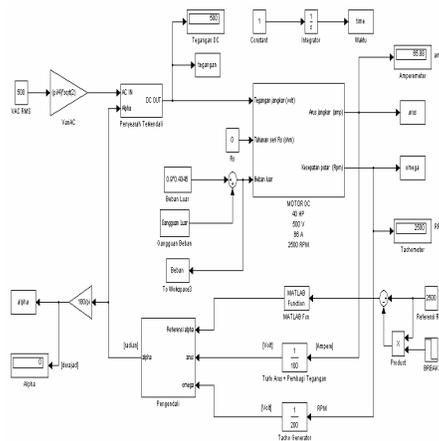
Gambar 8. Simulasi simulink motor dc loop terbuka ($R_s=0,44\text{ohm}$)

Pada hasil simulasi loop terbuka motor dc tampak bahwa :

1. Jika tahanan jangkar tidak ditambah dengan tambahan tahanan R_s ($R_s=0$), maka arus start jangkar yang dihasilkan saat motor dijalankan melonjak sebesar 900 Amper ($13,5$ kali I_{nom}) dan kecepatan motor *over shoot* melebihi kecepatan nominal (3000 rpm) dalam waktu yang singkat dan akan stabil pada arus $I_a=66$ A dan kecepatan nom = 2500 rpm (gambar a)
2. Jika tahanan jangkar ditambah dengan tahanan R_s ($R_s=0,44\Omega$) maka arus jangkar yang dihasilkan saat motor dijalankan sebesar 500 Amper ($7,5$ kali I_{nom}) dan kecepatan motor tidak mengalami *overshot* / beresilasi tetapi mengalami penurunan kecepatan menjadi 2363 rpm. Dibanding pada saat tanpa tahanan R_s .

C. Simulasi Loop Tertutup

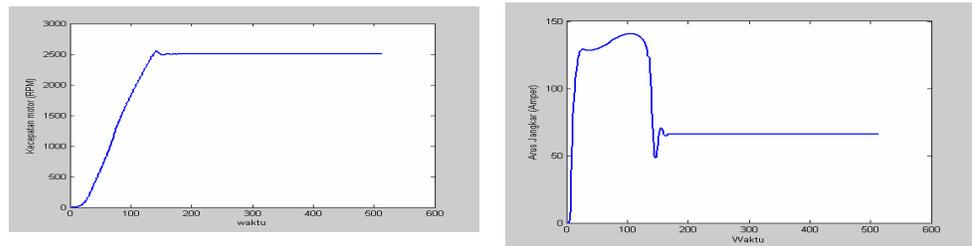
Simulasi loop tertutup menggunakan penyearah 1 fasa gelombang penuh terkendali sebagai sumber tegangan dc pada motor dc. Simulasi pengendalian kecepatan motor dc dari berbagai perubahan beban atau gangguan beban sesaat. Tujuan pengendalian adalah memperkecil arus *start*, memperkecil pengaruh gangguan terhadap kecepatan motor, dan membuat variasi kecepatan motor. Simulasi loop tertutup dengan umpan balik arus jangkar dan kecepatan motor dc diperlihatkan pada gambar 9.



Gambar 9. Model Simulink untuk Simulasi motor dc shunt Dengan pengendali penyearah Terkendali

D. Identifikasi Penguatan Arus & Kecepatan

Untuk penentuan besarnya penguatan arus dan kecepatan pada simulink pengendali perubahan rpm ke alpha, maka perlu mengidentifikasi hasil simulasi pada gambar 7 (tahanan $R_s=0$ ohm) yaitu model simulink motor dc loop terbuka. Pada gambar tersebut terlihat adanya osilasi dan *overshoot* yang sangat besar. Untuk menghilangkan osilasi dan *overshoot* pada gambar hasil simulasi tersebut maka harus terlebih dahulu menentukan nilai penguatan arus dan kecepatan. Berdasarkan hasil perhitungan dan coba-coba diperoleh penguatan arus sebesar 2 dan penguatan kecepatan sebesar -0.2. Dengan nilai penguatan sebesar itu maka hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 10.

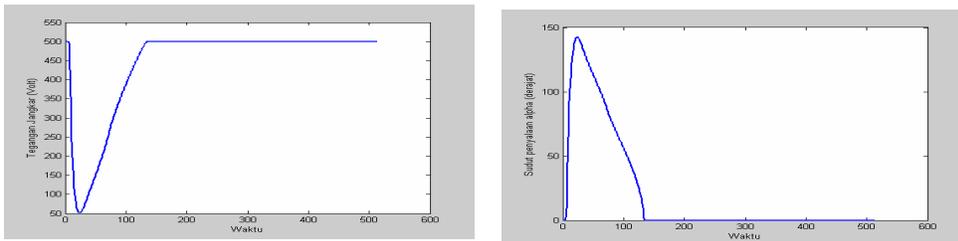


Gambar 10. Simulasi simulink motor dc loop tertutup ($R_s=0$)

Hasil simulasi gambar 10 menunjukkan bahwa osilasi dan *overshot* yang terjadi dapat diperkecil. Besarnya arus jangkar saat *start* menjadi lebih kecil $I_a=135$ A (2 kali Inominal) dibanding arus jangkar motor dc loop terbuka.

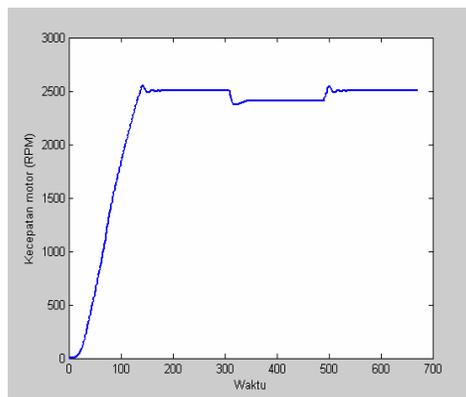
E. Pengendali Sudut Penyalaan α

Hasil simulasi pada simulink pengendali sudut penyalaan alpha diperlihatkan pada gambar 11. menunjukkan adanya perubahan sudut alpha sehingga tegangan sumber dari penyearah terkendali dapat berubah-ubah sesuai dengan perubahan sudut alpha. Besarnya sudut alpha berubah dari 0^0 sampai 180^0 , tergantung pada arus jangkar dan kecepatan motor. Jika arus jangkar dan kecepatan motor stabil maka sudut penyalaan alpha sama dengan 0^0 dan tegangan sumber dc sama dengan 500 Volt.



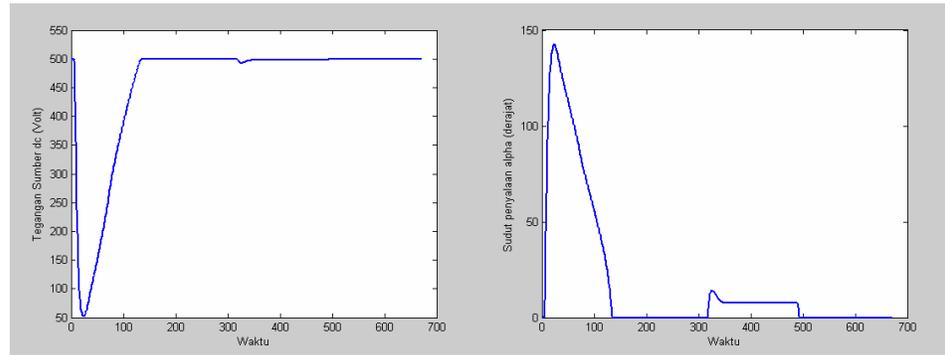
Gambar 11. Simulasi pengendali sudut Penyalaan alpha & tegangan sumber dc

Gangguan beban sesaat diberikan selama 5 detik ($t = 10$ s/d 15 detik), besarnya gangguan beban adalah sama dengan beban B yaitu 0.4354 N.m.sec/rad. Hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 12, menunjukkan adanya perubahan pada kecepatan motor saat ada gangguan beban sesaat, akan tetapi dengan pengendali penyearah terkendali maka kecepatan motor dapat distabilkan kembali



Gambar 12. Perubahan kecepatan saat Ada gangguan beban sesaat

Gangguan beban sesaat juga mempengaruhi sudut penyalan alpha penyearah terkendali dan tegangan sumber dc. Hasil simulasi diperlihatkan pada gambar 13, menunjukkan adanya perubahan sudut penyalan alpha dan tegangan sumber dc yang diakibatkan oleh perubahan kecepatan motor dc dari pengaruh gangguan beban sesaat. Tegangan sumber dc dan sudut alpha akan stabil kembali saat gangguan beban sesaat stabil.



Gambar 13. Perubahan tegangan sumber dc dan sudut penyalan alpha penyearah terkendali

IV. KESIMPULAN DAN SARAN

A. Kesimpulan

1. Dengan pengasutan langsung pada tegangan sumber (sistem loop terbuka), arus *start* akan sangat tinggi mencapai 13,5 x arus nominal dan terjadi osilasi/*overshoot* sehingga dapat mengganggu jalannya motor dc
2. Dengan pengendali penyearah gelombang penuh terkendali (sistem loop tertutup), arus *start* menjadi lebih kecil 2 x arus nominal ($I_a = 135 \text{ A}$) dan osilasi yang terjadi dapat teredam
3. Saat ada gangguan beban sesaat maka kecepatan, Arus jangkar, sudut penyalan alpha, dan tegangan sumber dc mengalami perubahan sesaat tetapi kondisi ini dapat distabilkan kembali dengan menggunakan pengendali penyearah terkendali.
4. Penguatan arus dan kecepatan pada pengendali sudut penyalan alpha sangat mempengaruhi grafik keluaran motor dc (kecepatan, arus jangkar)
5. Dengan pengasutan DOL pada motor dc shunt, arus *start* akan sangat tinggi, mencapai 15 x arus nominal
6. Dengan pengasutan resistansi, arus *start* lebih kecil dari pengasutan DOL, dan steady state pada nilai nominalnya, yaitu 36 A.

B. Saran

1. Untuk memperoleh arus *start* yang lebih baik, dapat menambah jumlah/nilai resistansi seri.
2. Pengasutan juga dapat dilakukan dengan mengatur tegangan awal (tegangan sumber).

V. DAFTAR PUSTAKA

Fitzgerald, A.E. dkk. 1997. *Mesin-mesin Listrik*. Jakarta: Erlangga

Hanselman, Duane and Bruce Littlefield. 2001. *Matlab Bahasa Komputasi Teknis*. Yogyakarta: Andi Yogyakarta

Ong, Che-Mun. 1998. *Dynamic Simulation of Electric Machinery (Using Simulink Matlab)*. New Jersey: Prentice Hall International

R.Krishnan, 2001, *Electric Motor Drives Modelling Analysis and control*, Virginia, Prentice Hall International.

Sumanto, Drs. 1993. *Mesin Arus Searah*. Yogyakarta: Andi Offset

Tjatur Wahyu, Puja Astawa dan Tri Budi Santoso. 1999. *Pelatihan Perangkat Lunak Matlab*. Surabaya: PENS-ITS