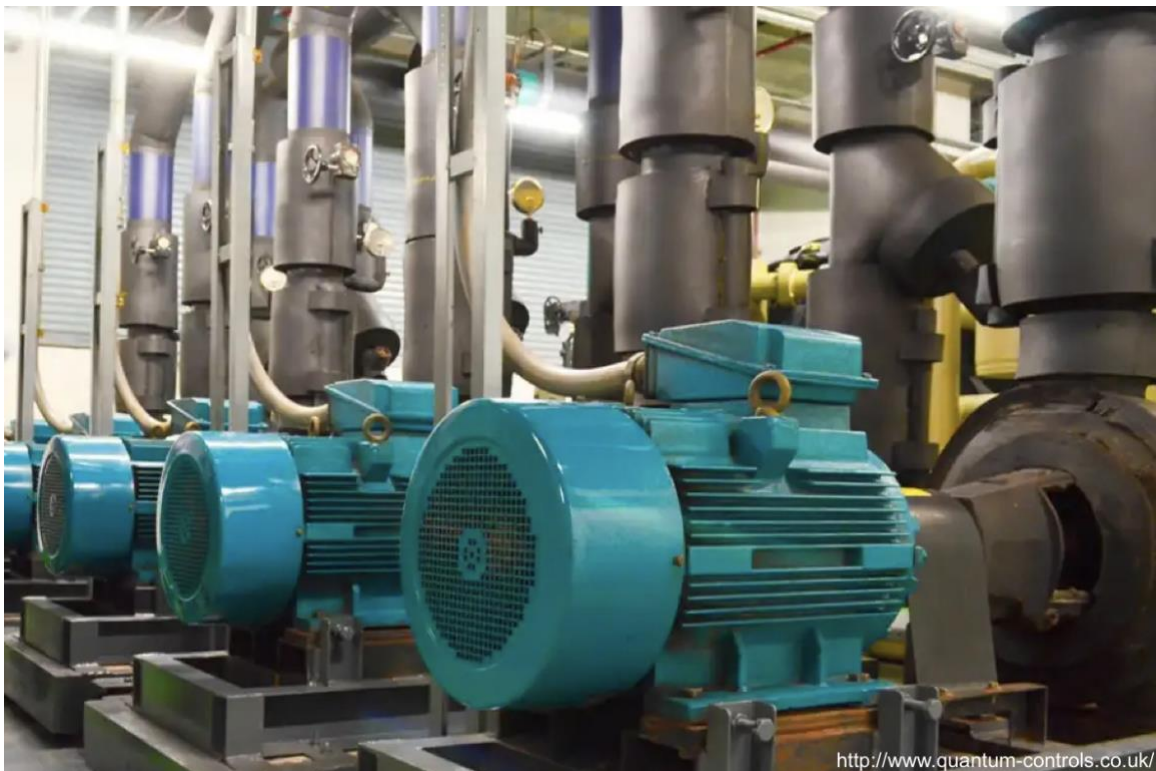


PANDUAN PRAKTIK

Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi



Dr. Muchlas, M.T.
Universitas Ahmad Dahlan
Yogyakarta, Edisi Perbaikan 2020

PANDUAN PRAKTIK

Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

Dr. Muchlas, M.T.
Universitas Ahmad Dahlan
Yogyakarta, Edisi Perbaikan 2020

Edisi Perbaikan 2020.

Ditulis dan diterbitkan secara pribadi pertama kali pada Desember 2017 oleh Dr. Muchlas, M.T.

Penulis semenjak 1987 sampai sekarang aktif sebagai dosen pada program studi Pendidikan Fisika, Teknik Elektro, Magister Pendidikan Vokasi, dan Pendidikan Vokasional Teknik Elektronika Universitas Ahmad Dahlan untuk matakuliah Elektronika Analog, Elektronika Digital, Sistem Berbasis Mikroprosesor, dan Strategi Pembelajaran Vokasi.

Perangkat pembelajaran untuk mendukung praktik Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi dapat diperoleh secara gratis dengan mengunduhnya melalui *link* berikut ini: http://muchlas.ee.uad.ac.id/downloads/motor_control.zip

Penulis mengizinkan kepada siapapun untuk memperoleh dan menggunakan, serta menyebarluaskan dan menggandakan panduan ini ke dalam berbagai bentuk media, selama tetap menyebutkan nama penulisnya dan memanfaatkannya untuk tujuan mulia, tanpa dipungut biaya.

KATA PENGANTAR

Panduan ini diterbitkan pertama kali pada Desember 2017, dan edisi ini merupakan perbaikan pertama yang dilakukan penulis pada masa-masa pandemi Covid-19.

Materi praktik yang ada di dalam panduan ini disesuaikan dengan materi perkuliahan Mesin-mesin Listrik dan Sistem Proteksi Motor khususnya jenis induksi tiga fase pada program studi Teknik Elektro.

Sebelum melaksanakan praktik, mahasiswa diwajibkan menyusun tugas pendahuluan agar memiliki bekal yang baik sehingga dapat melaksanakan kegiatan ini dengan lancar dan benar. Oleh karena praktik ini bersifat simulatif menggunakan simulator berbasis SIMULINK dari MATLAB, maka sebelum melaksanakan praktik mahasiswa **wajib mengikuti kegiatan pra praktik berupa pelatihan menggunakan panduan simulator bersama asisten praktik masing-masing**. Metode pelaksanaan praktik menggunakan pendekatan kolaboratif sehingga peserta sangat disarankan untuk berdiskusi secara intensif dalam kelompoknya dan juga bersama instruktur pendamping sebelum, selama, dan sesudah pelaksanaan praktik.

Kepada semua pihak yang telah membantu penyusunan panduan ini dan membantu uji coba simulator, diucapkan terimakasih. Semoga bantuan tersebut menjadi amal sholeh dan mendapat imbalan pahala dari Allah Subhanahu wa ta'ala.

Dengan berbagai kekurangannya, panduan ini diharapkan dapat memberi manfaat sesuai dengan fungsinya. Masukan-masukan dari siapapun akan sangat dinanti demi perbaikan panduan praktik ini.

Yogyakarta, April 2020

Dr. Muchlas, M.T.

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL.....	i
KATA PENGANTAR	iii
DAFTAR ISI.....	iv
A. TUJUAN PRAKTIK.....	1
B. LANDASAN TEORI.....	2
C. TUGAS PENDAHULUAN	23
D. ALAT DAN BAHAN PRAKTIK	24
E. PROSEDUR EKSPERIMEN.....	25
F. TUGAS AKHIR	26
DAFTAR PUSTAKA	27

PANDUAN PRAKTIK SISTEM KENDALI MOTOR INDUKSI BERKINERJA TINGGI

Motor induksi memiliki kelebihan-kelebihan yang tidak dimiliki oleh motor jenis lain seperti motor DC, sehingga banyak digunakan dalam bidang industri. Untuk daya yang sama, mesin ini harganya lebih murah, konstruksinya lebih kuat dan pemeliharaannya lebih mudah. Namun pada sisi lain, motor jenis induksi ini memiliki kelemahan fundamental yakni pada saat *start-up* membangkitkan lonjakan arus dan torsi yang dapat menimbulkan efek kedip mengganggu alat-alat listrik yang dipasang pada *power line* yang sama, dan dapat menimbulkan kerusakan pada belitan motor. Untuk meningkatkan kinerja motor, sehingga dengan harga yang lebih murah dapat diperoleh mesin yang lebih kuat dengan performansi yang tinggi, motor perlu dilengkapi dengan *soft-starter* untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi pada saat transien, serta unit *stall detection* yang akan mematikan secara otomatis catu tegangan motor, jika terjadi *stall* pada keadaan *steady-state*. *Stall* adalah keadaan yang menunjukkan motor memperoleh torsi beban melebihi torsi maksimum yang dapat dibangkitkan sehingga rotor akan berhenti berputar sementara catu tegangan masih terpasang. Keadaan ini dapat menimbulkan kerusakan pada motor jika catu tegangan tidak segera dimatikan.

A. TUJUAN PRAKTIK

Topik Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi ini merupakan salah satu materi dari praktik Mesin-mesin Listrik yang bertujuan:

1. Agar mahasiswa memahami cara kerja sistem kendali motor berkinerja tinggi untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi lebih saat *start up* (*soft starter*).
2. Agar mahasiswa memahami cara kerja sistem kendali motor berkinerja tinggi untuk melindungi dari keadaan *stall* saat *steady state* (*stall detector*).
3. Agar mahasiswa terampil dalam:
 - a. menggambarkan diagram blok sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dilengkapi dengan unit proteksi
 - b. merangkai pengendali tegangan dengan *thyristor* untuk motor induksi tiga fase
 - c. melakukan *setting-up* urutan pulsa pemicuan *thyristor* yang benar pada pengendali tegangan motor induksi tiga fase

- d. melakukan eksperimen untuk menentukan sudut pemicuan minimum pada pengendali tegangan menggunakan *thyristor*
- e. menginstalasi dan mengoperasikan dengan benar motor induksi tiga fase yang dilengkapi unit proteksi *soft-starter* dan detektor *stall*
- f. melakukan pengukuran besaran-besaran motor induksi menggunakan instrumen listrik tiga fase dan *storage oscilloscope*
- g. melakukan eksperimen untuk menentukan karakteristik motor induksi tiga fase yang dikendalikan oleh unit *soft-starter* dan *stall detector*
- h. menginterpretasikan hasil pengukuran karakteristik motor berkinerja tinggi

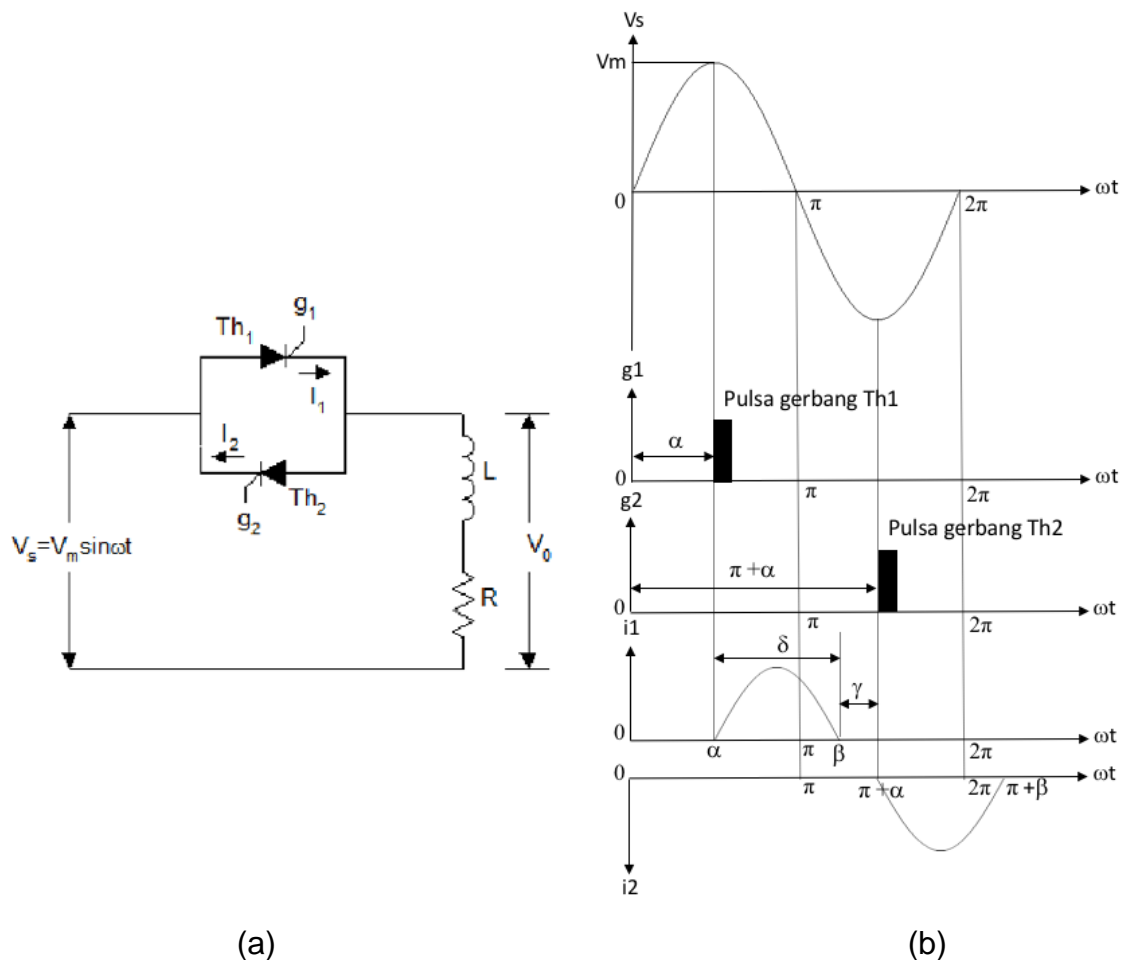
B. LANDASAN TEORI

1. Prinsip Kerja Pengendalian Tegangan Motor Menggunakan *Thyristor*

Praktik ini menggunakan model pengendalian tegangan (*voltage controller*) yang dilakukan oleh *thyristor* terpicu. Pengendalian tegangan pada sistem tiga fase menggunakan *thyristor* terpicu dengan beban motor induksi, dapat disusun dalam konfigurasi *star* untuk keduanya (*thyristor* dan motor), konfigurasi *delta* untuk keduanya atau salah satu membentuk konfigurasi *star* dan lainnya *delta* atau sebaliknya. Dalam praktik ini, konfigurasi yang digunakan adalah motor dan *thyristor* keduanya dalam konfigurasi *star*.

Prinsip kerja pengendali tegangan tersebut mengacu pada watak piranti semi konduktor *thyristor* sebagai saklar yang pada suatu saat dapat mengalirkan arus dan saat yang lain berfungsi memutus arus. Sifat sebagai saklar ini dapat terjadi karena *thyristor* dilengkapi dengan elektrode *gate* yang berfungsi sebagai pintu masukan sinyal *trigger* untuk mengatur fungsi menghantar (ON) dan tak menghantar (OFF) antara elektrode anode dan katodenya. *Thyristor* akan bersifat sebagai saklar ON apabila pada *gate* yang ada diberi sinyal pemicu (*trigger*), dan menurut Mohan, Undeland & Robbins (2003: 18), pada saat *thyristor* ON tegangan *drop* yang muncul pada ujung-ujungnya berkisar 1 sampai dengan 3 volt. Perubahan dari keadaan ON ke OFF terjadi apabila tegangan anode *thyristor* bernilai lebih negatif dibandingkan tegangan katodenya. Kecepatan berubah dari keadaan ON ke OFF atau sebaliknya akan berbeda untuk setiap jenis *thyristor*, dan tergantung pada spesifikasinya. Penjelasan tentang pengendali tegangan

dengan sistem tiga fase akan lebih mudah dijabarkan dengan mendeskripsikan terlebih dahulu sistem satu fase seperti ditunjukkan pada gambar 1.



Gambar 1. Pengendali Tegangan 1-Fase dengan *Thyristor*. (a) Rangkaian, (a) Bentuk Gelombang Tegangan Sumber, Pulsa Pemacu, dan Arus yang Lewat *Thyristor*

Keterangan notasi untuk gambar 1 adalah V_s menunjukkan tegangan sumber berbentuk sinus yang besarnya tergantung waktu, V_m tegangan maksimum dari V_s , V_o tegangan pada beban, L dan R masing-masing induktansi dan resistansi sebagai beban rangkaian. Notasi Th_1 , g_1 , Th_2 dan g_2 berturut-turut adalah *thyristor* 1, *gate* dari *thyristor* 1, *thyristor* 2, dan *gate* dari *thyristor* 2, sedangkan i_1 dan i_2 adalah arus yang lewat *thyristor* 1 dan *thyristor* 2. Cara kerja pengendali tegangan 1-fase dapat dijelaskan dengan merujuk Gambar 1 (b) dengan asumsi beban resistif-induktif tidak mengandung gaya gerak listrik (GGL) lawan atau *back EMF*. Ketika pulsa pemacu diberikan pada sudut pemecuan (*firing angle*) α melalui g_1 , karena tegangan sumber V_s fasenya positif, maka

saat $\omega t = \alpha$, *thyristor* Th₁ ON dan mengalirkan arus i_1 ke beban L dan R . Telah diketahui bahwa pada beban resistif-induktif dengan sumber tegangan berbentuk sinus, arus akan terlambat dibandingkan tegangannya, oleh sebab itu, walaupun tegangan sumber sudah mencapai nilai nol yakni saat $\omega t = \pi$, arus i_1 terus mengalir hingga mencapai nilai nol pada $\omega t = \beta$. Sudut β disebut sebagai sudut pemadaman (*extinction angle*) karena saat $\omega t = \beta$, *thyristor* Th₁ padam (OFF) sehingga tidak mengalirkan arus. Jadi, pada saat ON, *thyristor* Th₁ mengalirkan arus dari $\omega t = \alpha$ sampai dengan $\omega t = \beta$ atau selama $\delta = \beta - \alpha$, sehingga sudut δ disebut sebagai sudut hantar *thyristor* (*conduction angle*). Selain tergantung pada nilai α , besarnya sudut hantar *thyristor* juga tergantung pada sudut faktor daya beban atau beda fase θ .

Untuk rentang waktu $\omega t = \beta$ sampai dengan $\omega t = \pi$, oleh karena pulsa pemicu belum diberikan, maka kedua *thyristor* dalam keadaan OFF, akibatnya tidak ada arus yang mengalir melalui beban. Oleh karena pada selang waktu ini kedua *thyristor* dalam keadaan OFF dan tidak mengalirkan arus, maka interval waktunya disebut sebagai sudut tak hantar *thyristor* (*holdoff angle*), diberi notasi γ . Ketika pulsa pemicu diberikan pada $\omega t = \pi + \alpha$ melalui *gate* g₂, anode Th₂ lebih positif dibandingkan katodenya sehingga Th₂ ON dan mengalirkan arus dalam arah negatif sampai dengan Th₂ OFF yakni pada $\omega t = \pi + \beta$. Arus sesaat i_1 dan i_2 yang dilewatkan oleh *thyristor* Th₁ dan Th₂, dapat diturunkan dari persamaan,

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 = V_m \sin \omega t \quad \text{persamaan (1)}$$

Persamaan (1) adalah bentuk dari *ordinary differential equation* orde satu yang dapat diselesaikan dengan berbagai metode yang tersedia. Mengacu pada penyelesaian yang dilakukan oleh Dewan, Slemon, & Straughen (1984: 60-61) dan Smith & Alley (1992: 283-285) dengan melakukan penyesuaian untuk rangkaian ekivalen motor induksi 1-fase, penyelesaian persamaan (1) dapat ditulis dalam bentuk seperti pada persamaan (2).

$$i_1 = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \theta) - \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \theta) e^{(\alpha - \omega t)R / \omega L}$$

persamaan (2)

Walaupun rumusan arus *thyristor* pada persamaan (2) tidak memunculkan variabel sudut β , namun besaran ini dapat ditentukan secara iteratif. Berdasarkan gambar

1 (b), terlihat bahwa sudut β terjadi ketika arus sama dengan nol atau $i_1(\omega t = \beta) = 0$. Dengan demikian, persamaan (2) dapat ditulis dalam bentuk seperti pada persamaan (3).

$$0 = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\beta - \theta) - \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\alpha - \theta) e^{(\alpha - \beta)R/\omega L}$$

persamaan (3)

Persamaan (3) memberikan penjelasan bahwa jika $i_1 = 0$, maka $\omega t = \beta$. Jika iterasi dilakukan terhadap persamaan (2) dalam interval waktu antara $\omega t = 0$ sampai dengan $\omega t = 2\pi$, maka akan dapat ditentukan nilai β yakni $\beta = \omega t$ ketika $i_1 = 0$. Dari gambar 1 (b) juga dapat ditemukan hubungan dari sudut-sudut yang ada, antara lain sudut hantar *thyristor* yakni,

$$\delta = \beta - \alpha \quad \text{persamaan (4)}$$

dan sudut tak hantar *thyristor* yakni,

$$\gamma = \pi + \alpha - \beta \quad \text{persamaan (5)}$$

Merujuk persamaan (4) dan persamaan (5), apabila melalui proses iteratif menggunakan persamaan (2) nilai β dapat ditentukan, maka nilai δ dan γ dapat ditemukan.

Berdasarkan persamaan (2), jika sudut pemicuan *thyristor* $\alpha = \theta$, maka akan diperoleh hubungan sebagai berikut,

$$i_1 = \frac{V_m}{\sqrt{R^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \theta) \quad \text{persamaan (6)}$$

dan merujuk persamaan (3) dapat dituliskan,

$$\sin(\beta - \theta) = \sin(\beta - \alpha) = 0$$

persamaan (7)

sehingga

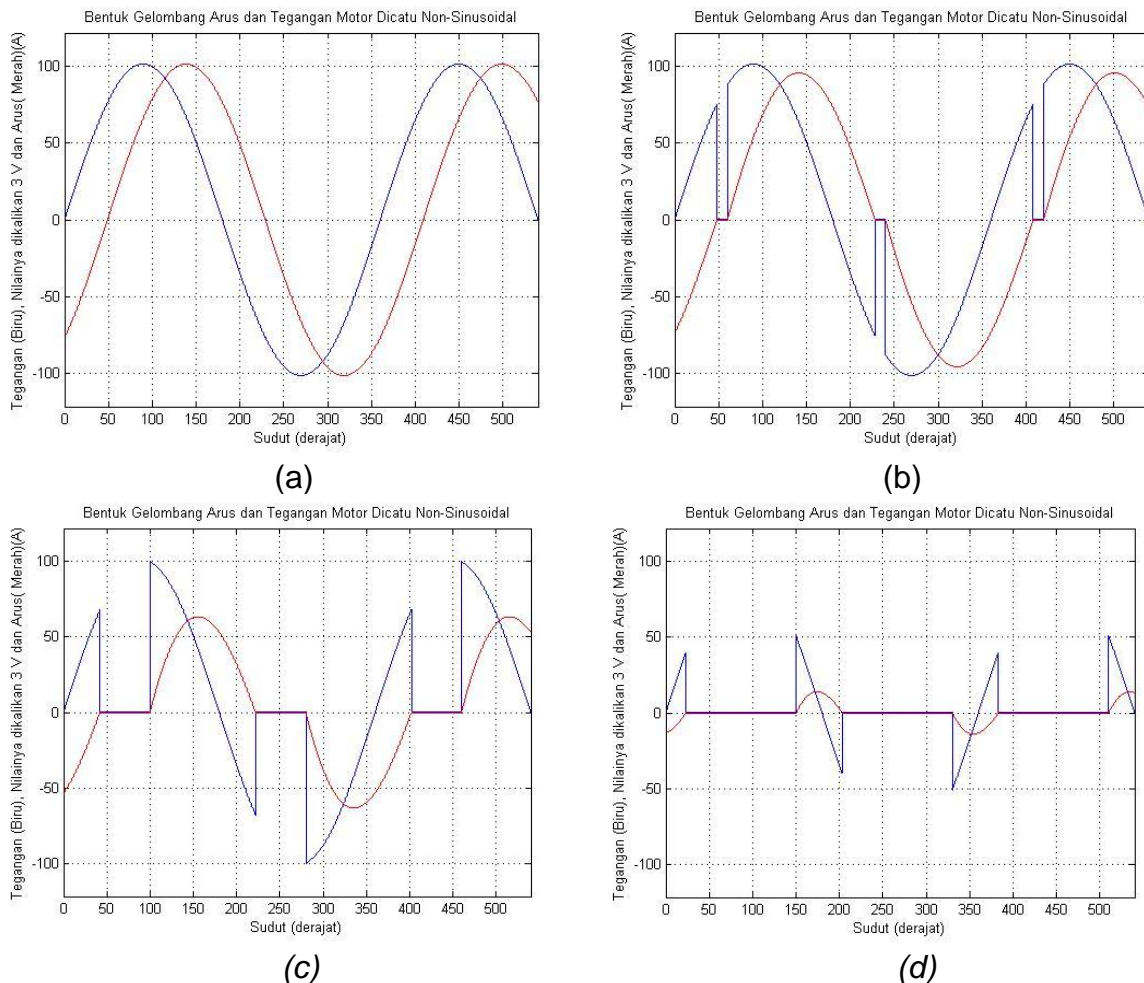
$$\beta - \alpha = \delta = \pi, \text{ dan } \gamma = 0 \quad \text{persamaan (8)}$$

Persamaan (6), persamaan (7) dan persamaan (8) di atas memberikan pengertian bahwa jika sudut pemicuan nilainya sama dengan sudut beda fase yakni $\alpha = \theta$, maka arus yang mengalir pada beban akan tertinggal sebesar θ terhadap tegangannya, dan akan berbentuk sinusoidal murni. Dalam hal ini sudut hantar δ tidak mungkin lebih besar dari π dan sudut pemicuan α tidak mungkin lebih kecil dari θ , sehingga nilai sudut pemicuan adalah,

$$\theta \leq \alpha \leq \pi \quad \text{persamaan (9)}$$

Dari persamaan (2) juga terlihat bahwa arus beban menjadi tidak kontinyu dan tidak sinusoidal jika sudut pemucuan α lebih besar dari sudut faktor daya beban θ seperti ditunjukkan pada gambar 1(b) di atas.

Dengan melakukan proses komputasi iteratif menggunakan persamaan (2) dan didukung oleh persamaan (4) sampai dengan persamaan (9), hasil simulasi menggunakan program Matlab untuk parameter motor Induksi 1-fase: $R_s=2,02 \Omega$, $R_r=4,12 \Omega$, $X_{ls}=2,32 \Omega$, $X_{lr}=1,76 \Omega$, $X_m=55,67 \Omega$, $V_{rated}=220 \text{ V}$, $I_{rated}=2,5 \text{ A}$, $f=50 \text{ Hz}$, dan $\omega_{rated}= 1440 \text{ rpm}$ ditunjukkan pada gambar-gambar berikut ini.

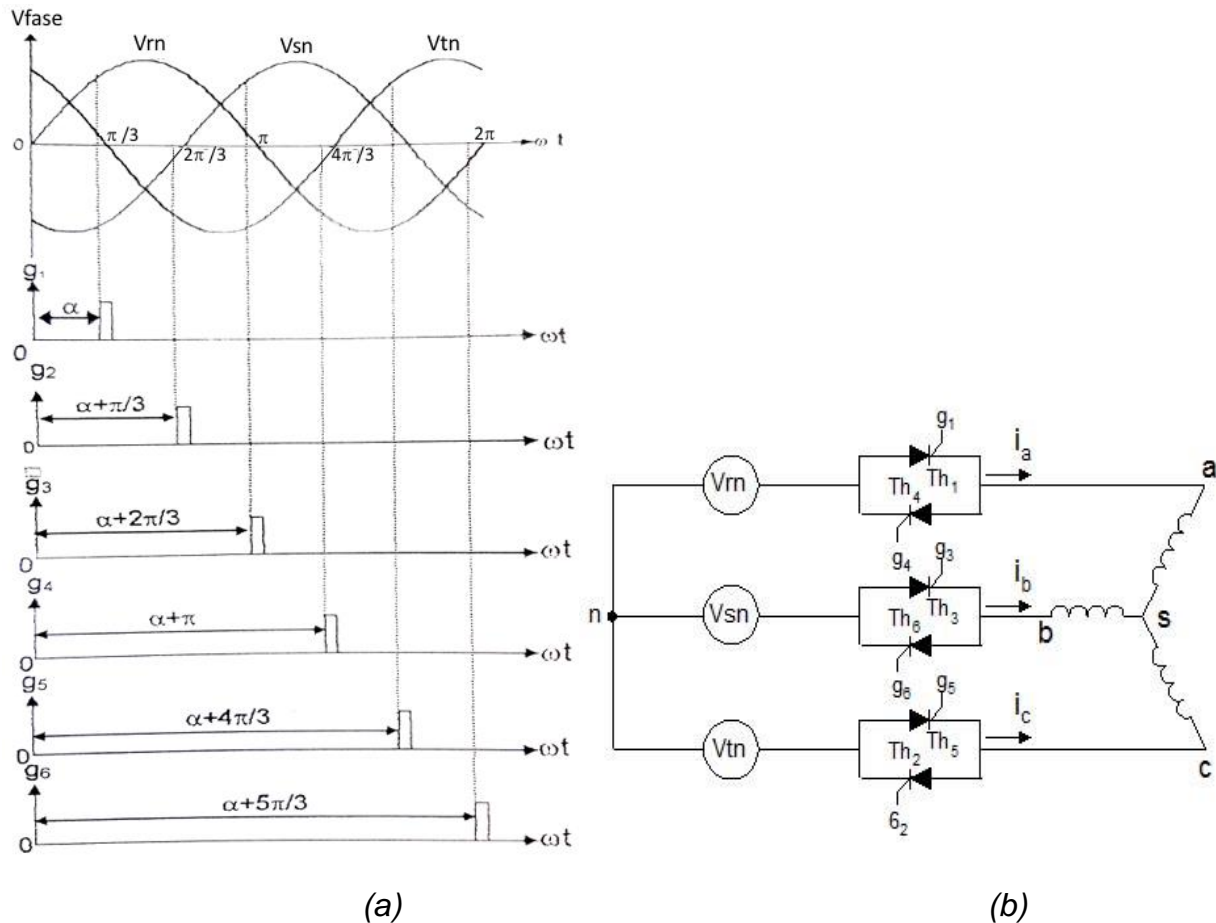


Gambar 2. Bentuk Gelombang Arus dan Tegangan Motor Induksi 1-Fase Dicatu Dengan Tegangan Terkendali Thyristor: (a) $\alpha=\theta=49^\circ$, (b) $\alpha=60^\circ$, (c) $\alpha=100^\circ$, dan (d) $\alpha=150^\circ$

2. Pengendali Tegangan Menggunakan Thyristor Untuk Beban Motor Tiga Fase

Mengacu pada teori yang digunakan dalam penelitiannya Muchlas (1998: 41), dan teori yang dikembangkan oleh Rahman (2011: 925), pengendali tegangan dengan

thyristor terpicu untuk keperluan catu daya motor induksi tiga fase ditunjukkan pada gambar 3. Dengan mengacu pada konfigurasi pengendali tegangan 1-fase, pada pengendali tegangan tiga fase diperlukan enam buah *thyristor* yang membentuk tiga pasang masing-masing dalam konfigurasi anti parallel (*back-to-back*). Setiap pasangan anti paralel tersebut dihubungkan secara seri dengan terminal sumber tegangan dan terminal stator dari motor.



Gambar 3. Pengendali Tegangan Tiga Fase Menggunakan Thyristor Terpicu Dengan Beban Motor Induksi: (a) Urut-urutan Pemicuan, (b) Rangkaian

Untuk membangun pengendali tegangan dengan sistem tiga fase, perlu dirancang terlebih dahulu urutan pemicuan yang dilakukan oleh *firing circuit* terhadap semua *thyristor* yang terpasang pada setiap fase sumber. Langkah-langkahnya dapat dilakukan dengan prosedur sebagai berikut: (1) menggambar tegangan sumber untuk semua fase dalam bentuk sinus dengan selisih fase masing-masing sebesar 120° listrik atau $2\pi/3$ dengan diberi nama misalnya V_{rn} , V_{sn} dan V_{tn} ; (2) menggambar semua pulsa yang

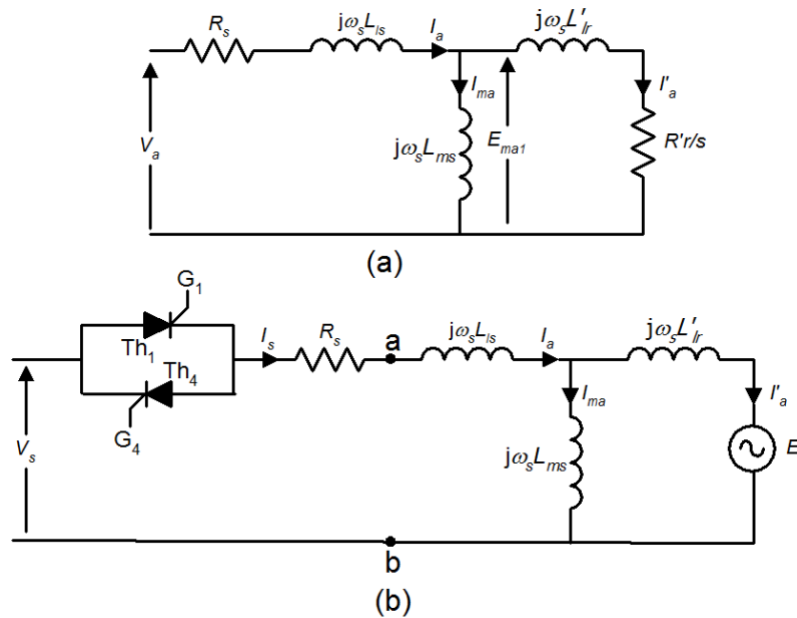
diperlukan untuk memicu semua *thyristor* sesuai urutan yang benar, yakni $g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6$ diberikan pada sudut $\alpha, \alpha+\pi/3, \alpha+2\pi/3, \alpha+3\pi/3, \alpha+4\pi/3$, dan $\alpha+5\pi/3$ seperti pada Gambar 3 (a); serta (3) menggambar rangkaian pengendali tegangan tiga fase sesuai urutan pemecuan yang telah dirancang seperti pada Gambar 3 (b).

Gambar 3 memperlihatkan bahwa untuk membangun pengendali tegangan dengan sistem tiga fase diperlukan enam buah pulsa pemecuan yang masing-masing memiliki selisih sudut sebesar $\pi/3$ atau 60° listrik. Sedangkan setiap pasangan *thyristor* anti paralel memerlukan dua buah pulsa yang memiliki selisih sudut π . Pada jalur fase V_{rn} *thyristor* Th_1 dan Th_4 dipicu oleh pulsa g_1 dan pulsa g_4 yang berjarak π . Dalam hal ini, *thyristor* Th_1 dipicu oleh g_1 pada saat $\omega t = \alpha$, sehingga V_{rn} mulai muncul pada fase positifnya. Pasangan *thyristor* Th_1 yakni *thyristor* Th_4 akan dipicu pada saat $\omega t = \pi + \alpha$ yang mengakibatkan munculnya tegangan V_{rn} pada fase negatifnya. Pada sistem tiga fase, selisih fase yang satu terhadap fase lainnya adalah 120° listrik atau $2\pi/3$, sehingga pemecuan berikutnya terhadap *thyristor* yang terhubung dengan fase V_{sn} dilakukan melalui g_3 pada $\omega t = \alpha + 2\pi/3$ untuk fase tegangan positif, sedangkan untuk fase negatif dari V_{sn} , pulsa pemecuan diberikan ke g_6 pada $\omega t = \alpha + 5\pi/3$. Untuk fase positif dari V_{tn} , pulsa pemecuan Th_5 diberikan melalui g_5 pada $\omega t = \alpha + 4\pi/3$, sedangkan untuk fase negatifnya pulsa pemecuan Th_2 diberikan pada $\omega t = \alpha + \pi/3$.

a. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Dicu Tegangan Bukan Sinus

Analisis terhadap motor induksi yang dicatu menggunakan sistem tegangan tiga fase terkendali *thyristor* telah dilakukan oleh banyak peneliti. Teori yang digunakan pada praktik ini akan menggunakan analisis yang pernah dilakukan oleh Hamed & Chalmers (1990: 184-193) dan pernah digunakan oleh Muchlas (1998: 43-60) sebagai teori dalam tesisnya.

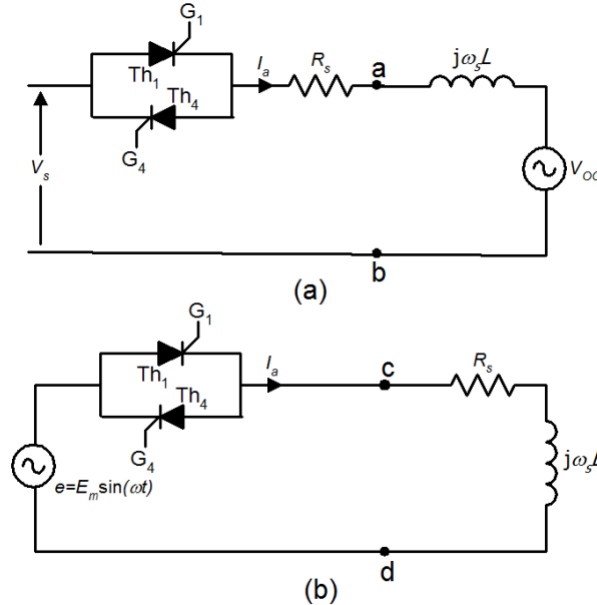
Analisis untuk memperoleh penyelesaian bentuk gelombang arus dan tegangan pada motor induksi tiga fase yang dicatu dengan tegangan berbentuk non-sinus menurut Hamed & Chalmers (1990) dapat dilakukan dengan mengubah rangkaian ekuivalen motor induksi ke dalam bentuk yang mempertimbangkan munculnya GGL (gaya gerak listrik) lawan (*back EMF*) pada beban motor. Gambar berikut ini merupakan rangkaian ekuivalen asli dan rangkaian ekuivalen yang telah diubah bentuknya.



Gambar 4. Rangkaian Ekuivalen Motor Induksi Tiga Fase: (a) Rangkaian Asli, (b) Rangkaian Dengan Mempertimbangkan GGL Balik atau *Back EMF* (Hamed & Chalmers, 1990)

Motor induksi sebagai suatu beban dari rangkaian listrik bolak-balik memiliki karakteristik tersendiri. Pada umumnya rangkaian ekuivalen motor induksi hanya digambarkan dalam bentuk gabungan beban resistif dan induktif, namun dalam kenyataannya motor induksi mengandung tambahan beban GGL lawan. Oleh sebab itu, rangkaian ekuivalen motor induksi perlu dilakukan modifikasi agar sesuai dengan kenyataannya dengan mempertimbangkan munculnya GGL lawan. Struktur motor induksi yang terdiri atas belitan stator dan belitan rotor adalah penyebab munculnya GGL lawan ini. Pada satu sisi, untuk memutar rotor diperlukan catu tegangan pada bagian stator, namun pada sisi lain setelah motor berputar, rotor akan membangkitkan arus induksi yang disebabkan karena adanya interaksi gaya putar belitan stator dengan medan magnet yang dibangkitkan oleh stator. Memang, interaksi antara medan magnet stator dengan arus rotor dapat membangkitkan torsi motor, namun, ketika belitan rotor sudah berputar, terjadi interaksi antara belitan konduktor rotor yang berputar dengan medan magnet. Interaksi tersebut dapat membangkitkan arus induksi pada rotor sehingga menimbulkan GGL yang arahnya berlawanan dengan tegangan catu.

Berdasarkan Gambar 4, jika digunakan teorema *Thevenin*, dan dengan mempertimbangkan bahwa nilai L_{ms} jauh lebih besar daripada L'_{lr} maka rangkaian dapat diubah menjadi seperti pada gambar 5 berikut ini.



Gambar 5. Rangkaian Ekuivalen Sederhana dari Gambar 4 (Hamed & Chalmers, 1990)

Nilai tegangan V_{oc} pada Gambar 5 di atas sebesar,

$$V_{oc} = E_r \frac{L_{ms}}{L_{ms} + L'_{lr}} \quad \text{persamaan (10)}$$

yang dapat ditulis dalam bentuk,

$$V_{oc} = I'_a \left(\frac{R'_r}{s_1} \right) \left(\frac{L_{ms}}{L_{ms} + L'_{lr}} \right) \quad \text{persamaan (11)}$$

dan dapat diperoleh pula,

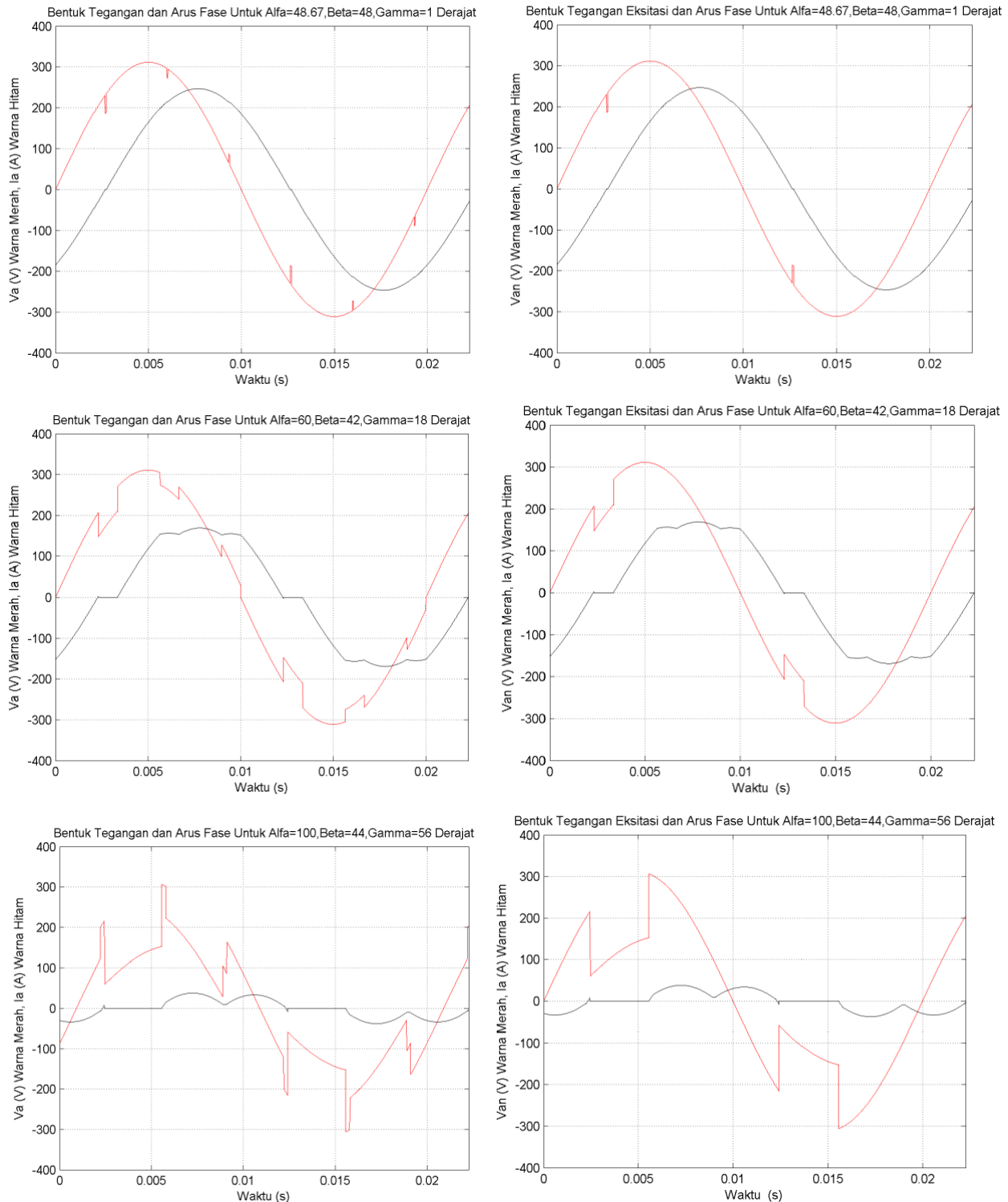
$$L = L_{ls} + \frac{L_{ms} L'_{lr}}{L_{ms} + L'_{lr}} \quad \text{persamaan (12)}$$

dengan $L = L_{ls} + L'_{lr}$, karena $L_m > L'_{lr}$. persamaan (13)

b. Bentuk Gelombang Tegangan dan Arus Stator

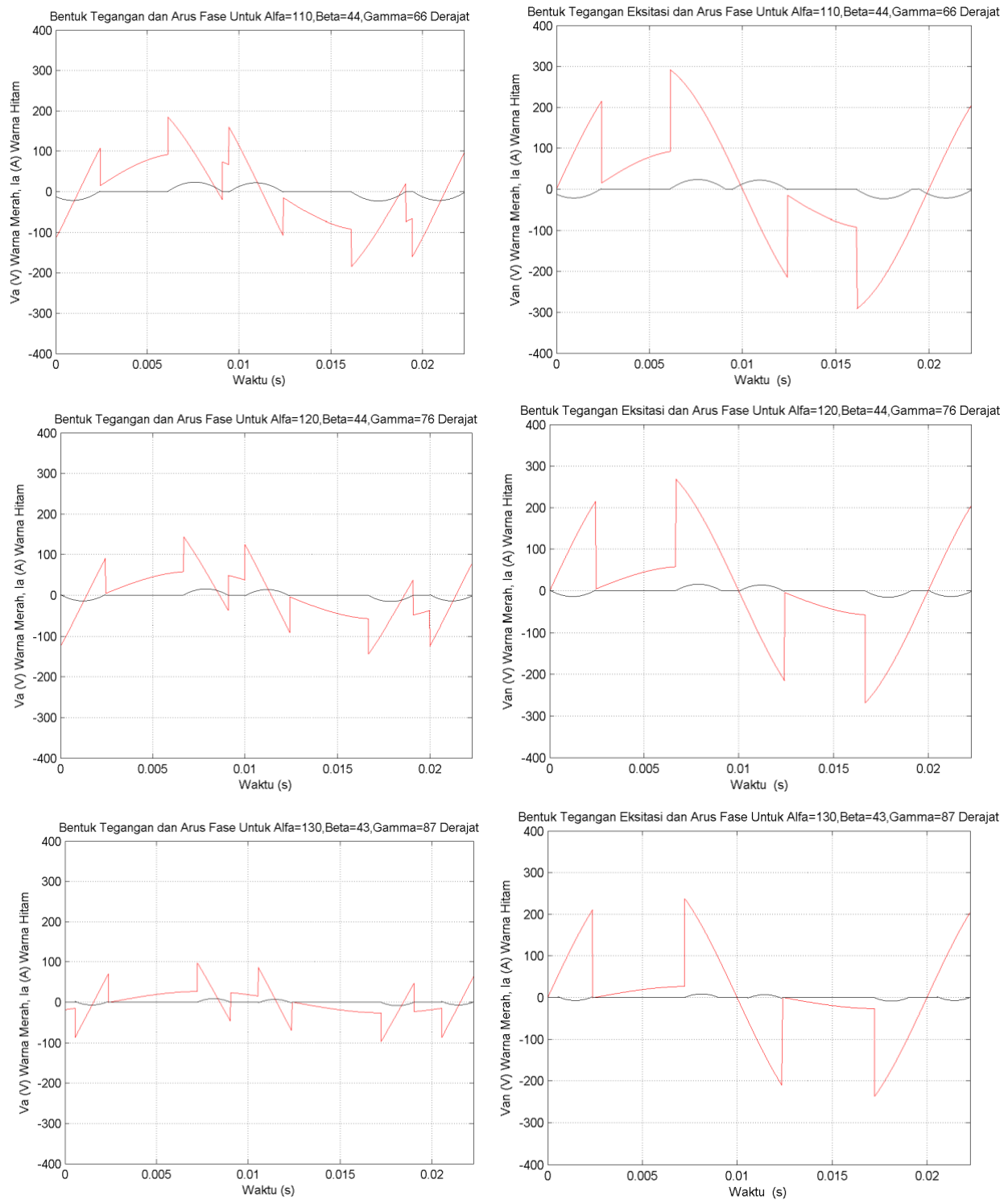
Pada Gambar 5 (b) telah ditunjukkan bahwa motor induksi yang dicatu menggunakan tegangan non-sinus, rangkaian ekuivalennya dapat disusun dengan menggunakan sebuah sumber tegangan $e(t)$ yang merupakan selisih antara tegangan catu dan GGL lawan, dihubungkan secara seri dengan sebuah impedansi. Melalui analisis yang dilakukan oleh Hamed & Chalmers (1990) dan komputasi oleh Muchlas

(1998), telah dihasilkan simulasi bentuk tegangan dan arus yang dicatu dengan tegangan non-sinus untuk operasi motor pada kondisi $\gamma < \pi/3$ seperti ditunjukkan pada Gambar 6 berikut ini.



Gambar 6. Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Motor Induksi 3-Fase Untuk $\gamma < \pi/3$

Sedangkan untuk operasi motor pada kondisi $\gamma > \pi/3$, hasil simulasi bentuk gelombang tegangan dan arusnya ditunjukkan pada gambar 7 berikut ini.



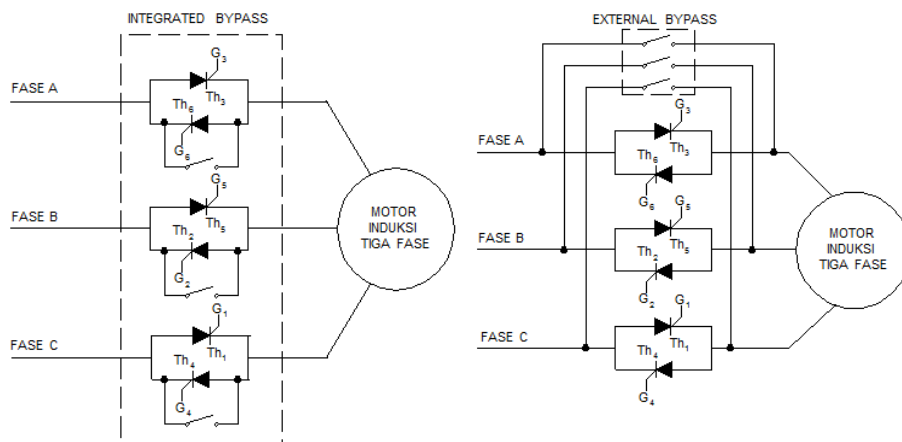
Gambar 7. Hasil Simulasi Tegangan dan Arus Motor Induksi 3-Fase Untuk $\gamma > \pi/3$

3. Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi

Sistem kendali motor berkinerja tinggi adalah sebuah gabungan piranti-piranti listrik dan elektronik yang dapat melakukan pengaturan tegangan catu untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi saat mesin melakukan *start-up*. Selain itu, dalam keadaan *steady-state* sistem dapat memutus catu tegangan secara otomatis ketika torsi beban melebihi torsi maksimum yang dibangkitkan sehingga motor terhindar dari keadaan *stall*, yakni keadaan rotor berhenti berputar dengan tegangan masih terpasang pada ujung-ujung stator. Jika catu tegangan tidak segera diputus, keadaan *stall* dapat menimbulkan kerusakan belitan motor. Untuk mengatasi hal ini, sistem kendali perlu dilengkapi dengan pendeteksi torsi sehingga *power line* segera dapat diputus secara otomatis jika terdeteksi potensi munculnya *stall* yang ditunjukkan oleh naiknya torsi menuju ke nilai maksimum.

a. Sistem Kendali *Soft-Start*

Terdapat dua sub sistem pada sistem kendali motor berkinerja tinggi yakni *soft-starter* dan *stall detector*. Menurut Mohan et al. (2003: 430-431), sistem pengendali *soft-starter* dapat diimplementasikan menggunakan rangkaian pengendali tegangan dengan *thyristor* terpicu yang disainnya seperti telah disajikan pada Gambar 3 (b). Sementara itu, menurut dua perusahaan ternama dalam bidang *Smart Motor Control* yakni Eaton Corporation (2013: 2) dan Rockwell Automation (2014: 3-7), desain *soft-starter* dapat menggunakan sistem pada Gambar 8.

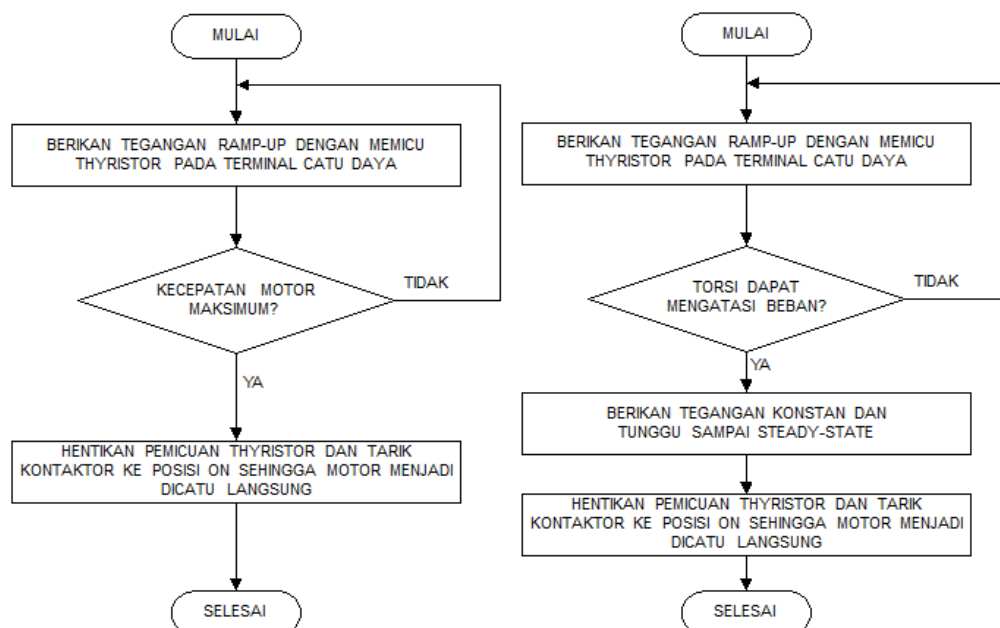


Gambar 8. Pengendali Tegangan Untuk *Soft-Starter* Versi *Eaton Corporation* dan *Rockwell Automation*

Mohan, et al. (2003) memberikan penjelasan bahwa prinsip *soft-starter* adalah mereduksi arus dan torsi awal dengan cara melakukan pengaturan sudut pemicuan

thyristor untuk memberikan tegangan sekecil-kecilnya saat motor melakukan *start-up*, namun tegangan tersebut mampu membangkitkan torsi yang dibutuhkan untuk mengatasi beban. Melalui cara ini, seiring turunnya *slip* atau naiknya kecepatan motor, arus stator dapat direduksi karena tegangannya kecil, dan saat *steady-state* setiap fase diubah koneksinya menjadi *direct-on-line supplied*.

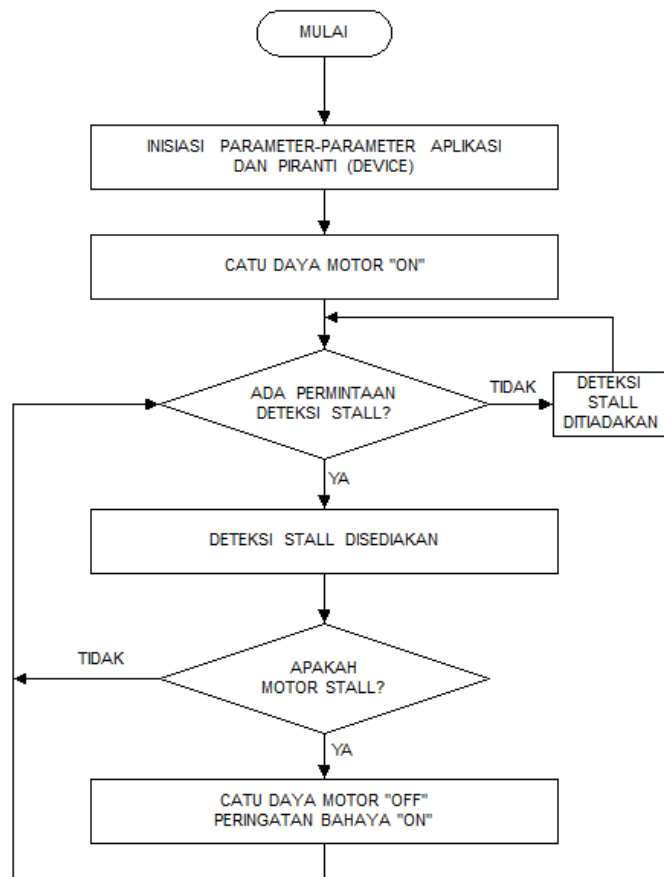
Sementara itu, perusahaan *Eaton Corporation* dan *Rockwell Automation* dalam publikasi yang diterbitkan untuk menyertai peluncuran produk-produknya, memberikan penjelasan bahwa reduksi *starting current* dan lonjakan torsi awal dapat dilakukan oleh *soft-starter* dengan memberikan tegangan dalam bentuk *ramp-up*, yakni tegangan yang nilainya berubah secara gradatif dari kecil sampai nilai tertentu. Pemberian tegangan ini dilakukan oleh pengendali dengan melakukan perubahan pemicuan *thyristor* setiap setengah periode tegangan inputnya, sehingga sudut pemicuannya berubah semakin kecil yang menghasilkan tegangan *ramp-up* semakin besar selama *start-up* berlangsung. Setelah kecepatan motor maksimum tercapai, kontaktor *bypass* ditarik ON sehingga motor beroperasi menggunakan *direct-on-line supplied*, kondisi seperti ini menjadikan pekerjaan *thyristor* lebih efisien. Algoritma pengendalian *soft-start* dari Mohan, et al. (2003), *Eaton Corporation* (2013), dan *Rockwell Automation* (2014) secara skematik ditunjukkan pada Gambar 9 berikut ini.



Gambar 9. Diagram Alir Algoritma *Soft-Start*: (a) Versi *Eaton Corporation* (2013) dan *Rockwell Automation* (2014), (b) Versi Mohan, et al (2003)

b. Sistem Kendali Deteksi *Stall*

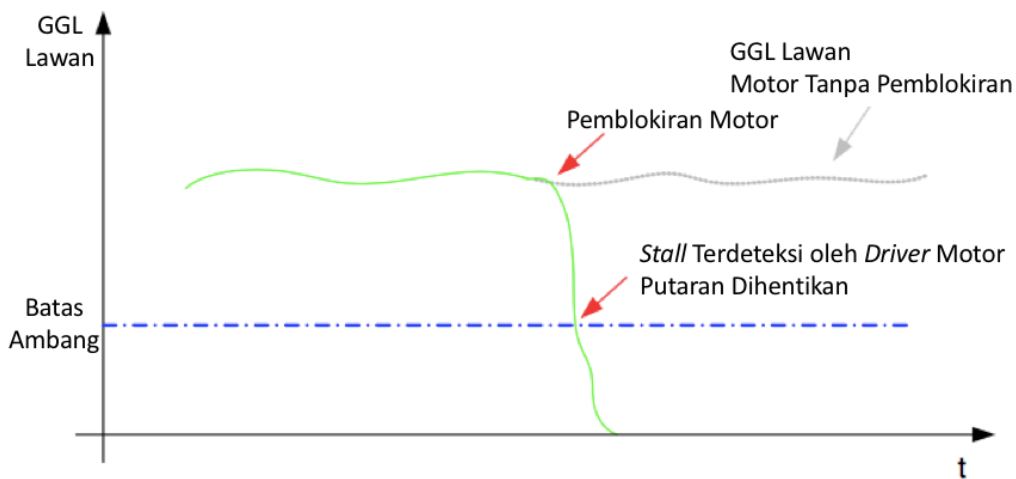
Sistem kendali deteksi *stall* digunakan untuk mendeteksi munculnya keadaan *stall*, yakni motor dalam keadaan berhenti berputar karena bebannya berlebihan namun tegangan catu masih terpasang. Jika pada keadaan ini catu tegangan tidak segera dimatikan, kondisi *stall* dapat menyebabkan kerusakan pada belitan motor. Agar motor tetap aman, sistem kendalinya perlu dilengkapi dengan pendeteksi keadaan *stall* yang akan mendeteksi situasi *overloaded* dan unit *breaker* yang akan melakukan langkah-langkah cepat dalam memutus catu daya ketika motor kelebihan beban. Penjelasan tentang prinsip kerja detektor *stall* dapat ditemukan pada dokumen-dokumen yang dipublikasikan oleh perusahaan-perusahaan yang bergerak dalam bidang pengendalian motor cerdas. Menurut dokumen *Application Note AN2149* dari perusahaan *Freescale Semiconductor*, dijelaskan bahwa prinsip sistem kendali deteksi *stall* dapat digambarkan seperti pada diagram alir yang disajikan melalui Gambar 10 (Mackay, 2004: 8-9).



Gambar 10. Diagram Alir Sistem Kendali Deteksi *Stall* pada Motor Listrik dari *Freescale Semiconductor, Inc.* (Mackay, 2004)

Berdasarkan Gambar 10 dapat diperoleh penjelasan bahwa pada sistem kendali deteksi *stall*, mula-mula dilakukan inisiasi parameter-parameter aplikasi, diteruskan dengan pemberian catu daya motor dan pengaktifan detektor. Jika terdeteksi adanya situasi *stall*, maka sistem kendali akan mematikan catu daya dan menghidupkan tanda peringatan bahaya. Sementara itu, dari dokumen *Application Note AN2650* yang diterbitkan oleh perusahaan *ST Microelectronics*, diperoleh informasi bahwa deteksi *stall* dapat dilakukan dengan menggunakan metode GGL Lawan. Pada motor yang mengalami *stall*, oleh karena rotor berhenti berputar maka belitannya tidak menimbulkan GGL Lawan. Ketiadaan GGL Lawan ini yang ditunjukkan oleh meningkatnya arus motor dapat digunakan sebagai indikator keadaan *stall*. Prinsip pendeteksian *stall* dilakukan dengan mendeteksi kenaikan arus motor yang terjadi selama mesin *running*, dan jika kenaikan arus mencapai batas ambang yang menunjukkan tidak adanya GGL Lawan, maka dianggap terjadi keadaan *stall*, selanjutnya dilakukan pemutusan terhadap arus fase yang mencatu motor (STMicroelectronics, 2013: 10).

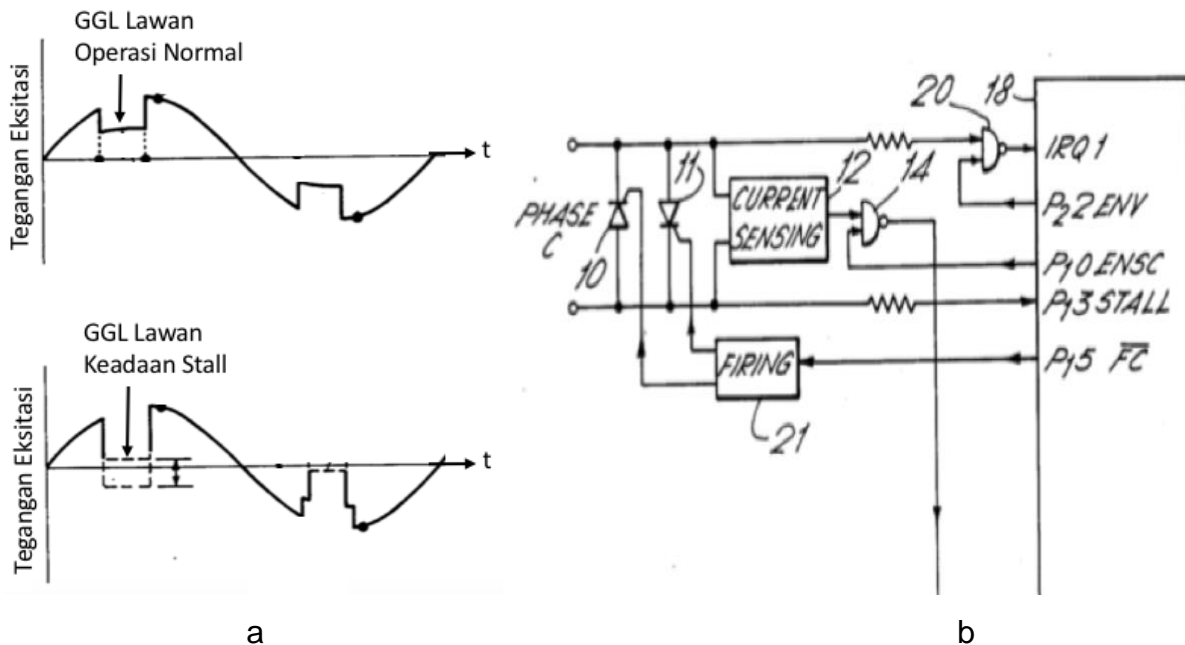
Penggunaan GGL Lawan sebagai metode pendeteksian keadaan *stall* juga digunakan oleh perusahaan kontrol mesin listrik cerdas *ON Semiconductor*, yang penjelasannya disajikan melalui Gambar 11 berikut ini.



Gambar 11. Prinsip Pendeteksian *Stall* Menggunakan GGL Lawan (ON-Semiconductor, 2015: 5)

Metode pendeteksian *stall* pada Gambar 11 di atas menggunakan nilai batas ambang sebagai parameter pengendalian. Batas ambang merupakan nilai GGL Lawan

yang dianggap menjadikan motor mengalami keadaan *stall*. Ketika terjadi pemblokiran pada motor, kecepatan putar rotor akan menurun secara drastis menyebabkan GGL Lawan juga menurun dan jika nilainya sampai pada batas ambang, pengendali akan menghentikan putaran motor dengan memutuskan arus catu daya. Pendeteksian GGL Lawan itu sendiri dapat dilakukan dengan berbagai metode, dan menurut Unsworth (1988: 9-17) pemegang *patent* Amerika Serikat nomor 4767975, GGL Lawan yang berhubungan dengan keadaan *stall*, dapat diperkirakan nilainya saat mencapai batas ambang dengan menggunakan prinsip seperti ditunjukkan pada Gambar 12 berikut ini.



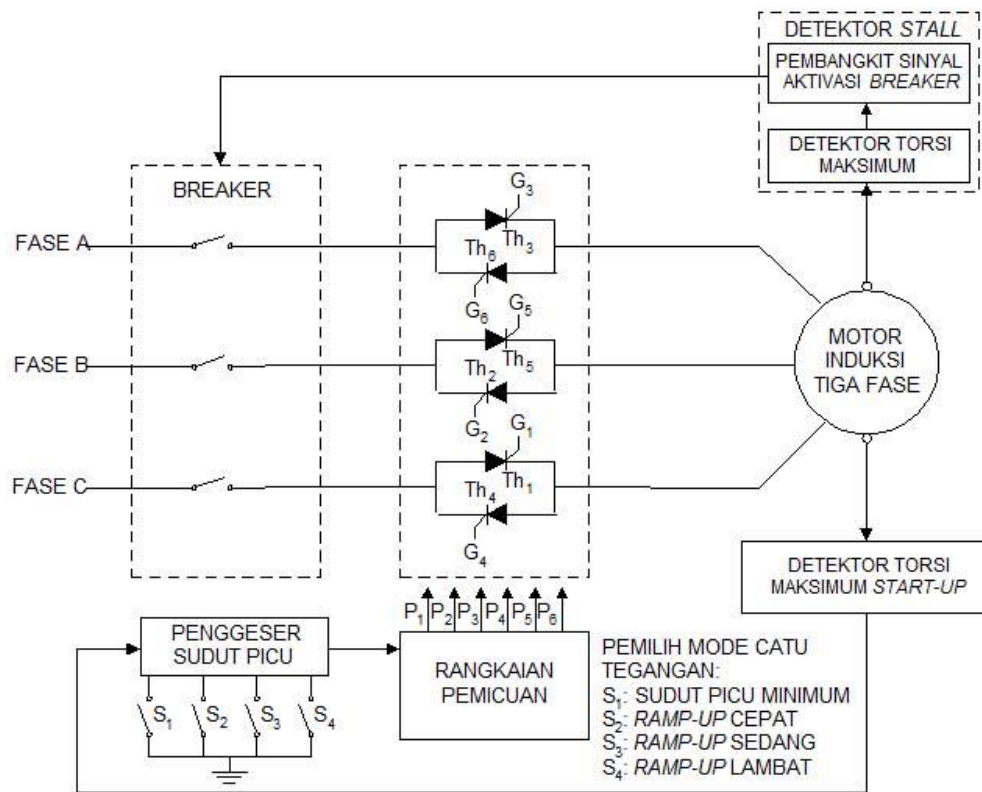
Gambar 12. Metode Deteksi *Stall* dari Unsworth (1988: 9-17): (a) Keadaan GGL Lawan, (b) Rancangan *Hardware*

Merujuk pada Gambar 12 (a) atas, terlihat bahwa GGL Lawan sebelum terjadinya *stall* bernilai positif di atas garis *base line* nol, sedangkan pada Gambar 12 (a) bawah menunjukkan keadaan pada saat terjadinya *stall*, dalam hal ini GGL Lawan bernilai mendekati 0 sampai dengan di bawah nol. Gambar 12 (b) adalah rancangan perangkat keras untuk mengimplementasikan pendeteksian *stall* berdasar GGL Lawan yang dibangkitkan motor. Sensor arus digunakan untuk mendeteksi keadaan GGL Lawan dan jika terdeteksi nilainya bersesuaian dengan keadaan GGL Lawan di sekitar *base line* nol, maka unit *sensing current* akan mengirim sinyal *stall* ke mikrokontroler. Mekanisme deteksi seperti ini dilakukan oleh unit *current sensing* untuk setiap fase tegangan catu

motor. Rancangan *hardware* dari *patent* tersebut telah menunjukkan bahwa pendeteksian keadaan *stall* dapat dilakukan dengan mendeteksi GGL Lawan menggunakan sensor arus saat nilainya mencapai batas ambang di sekitar nol.

4. Modul Praktik Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

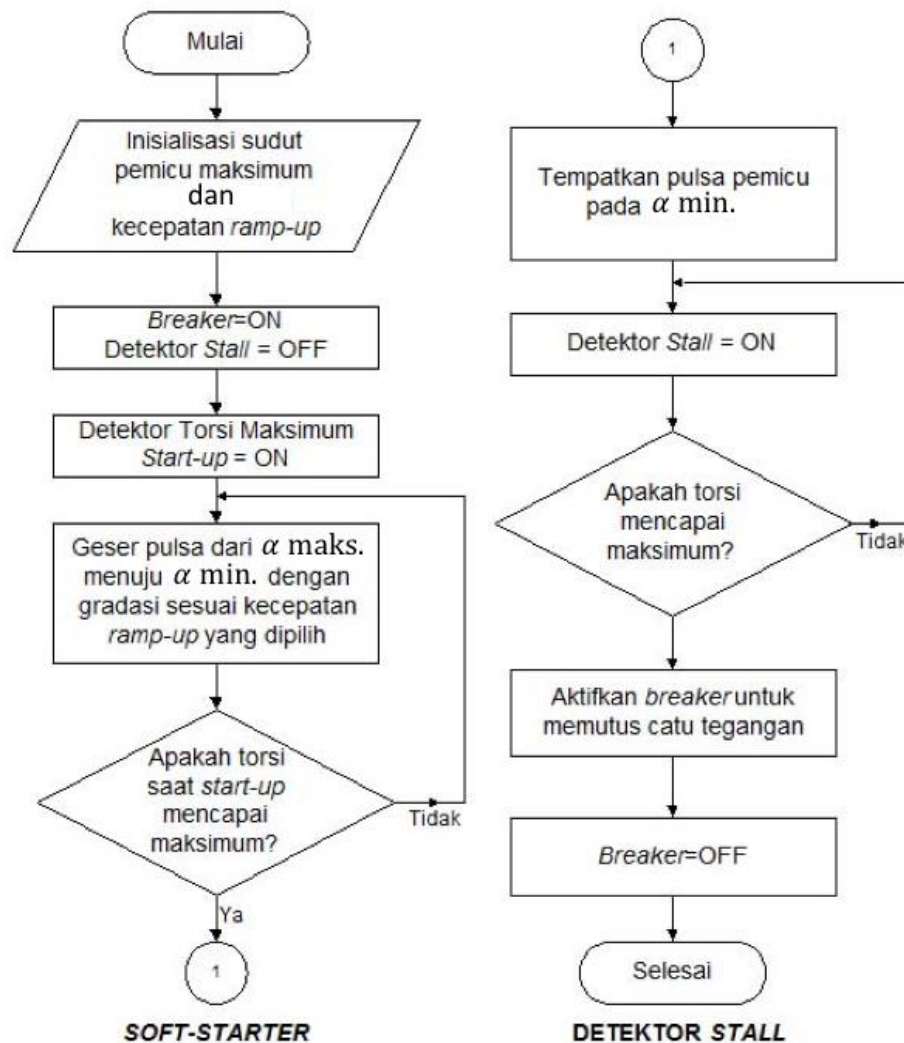
Mengacu pada landasan teori yang telah dikemukakan di atas, sistem kendali motor berkinerja tinggi dalam praktik ini diimplementasikan dengan menggunakan arsitektur perangkat keras seperti ditunjukkan pada gambar berikut ini.



Gambar 13. Arsitektur Sistem Kendali Motor Induksi Berkinerja Tinggi

Pemicuan setiap *thyristor* dilakukan oleh sebuah *firing circuit* yang di dalamnya terkandung rangkaian generator yang mampu membangkitkan pulsa tersinkronisasi sebanyak 6 buah. Pemilihan mode catu dilakukan oleh rangkaian penggeser pulsa yang menyediakan 4 mode yakni catu menggunakan sudut alfa minimum (catu langsung), *ramp-up* cepat, *ramp-up* sedang, dan *ramp-up* lambat. Pada mode catu menggunakan sudut pemicuan minimum, sistem ini hanya dapat memberikan sudut picu paling rendah

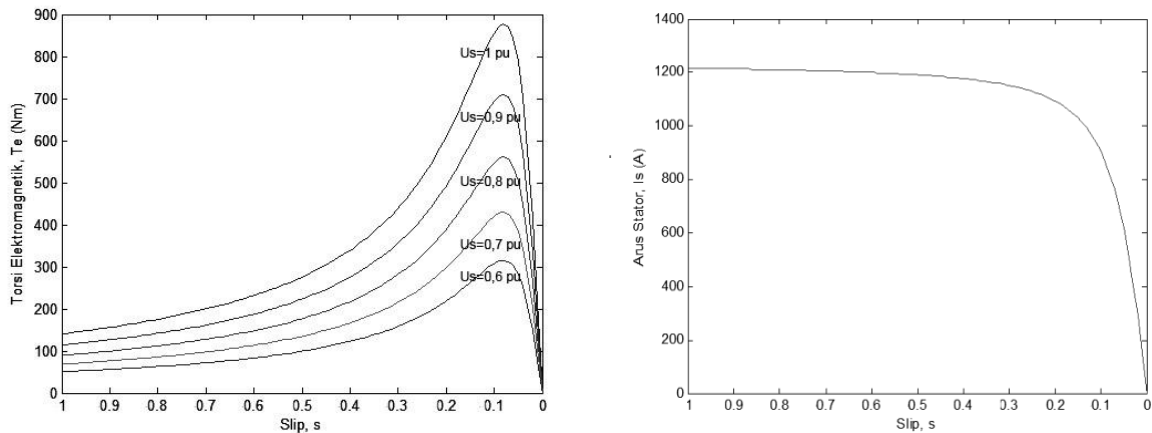
190 listrik. Mode catu menggunakan tegangan *ramp-up* merupakan implementasi dari sistem kendali *soft-start*. Algoritma pengendalian untuk fitur *soft-starter* dan detektor keadaan *stall* ditunjukkan oleh diagram alir pada Gambar 14 berikut ini.



Gambar 14. Algoritma Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi

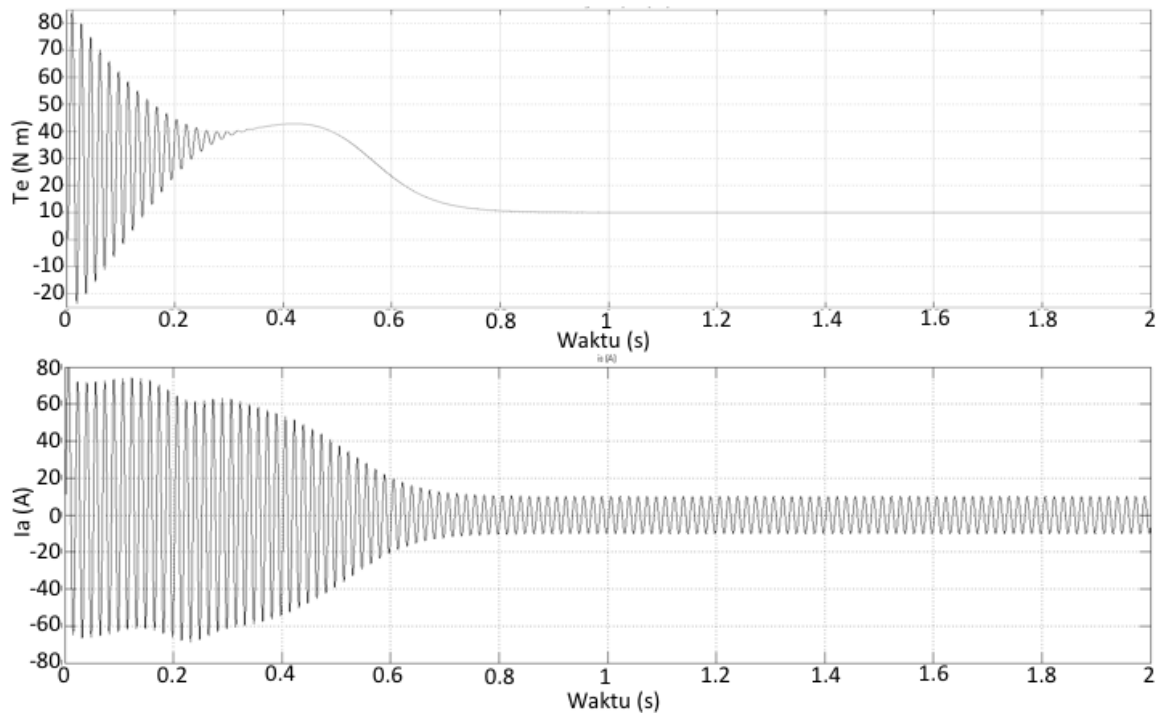
5. Karakteristik Motor Berkinerja Tinggi

Karakteristik motor induksi pada umumnya disajikan dalam bentuk grafis yang menampilkan besaran arus, torsi elektromagnetik dan kecepatan putar rotor. Pada karakteristik tradisional, besaran-besaran motor tersebut disajikan dalam fungsi *slip*, sedangkan pada karakteristik dinamis penyajiannya dalam fungsi waktu. Berikut ini adalah contoh penyajian karakteristik tradisional motor induksi.



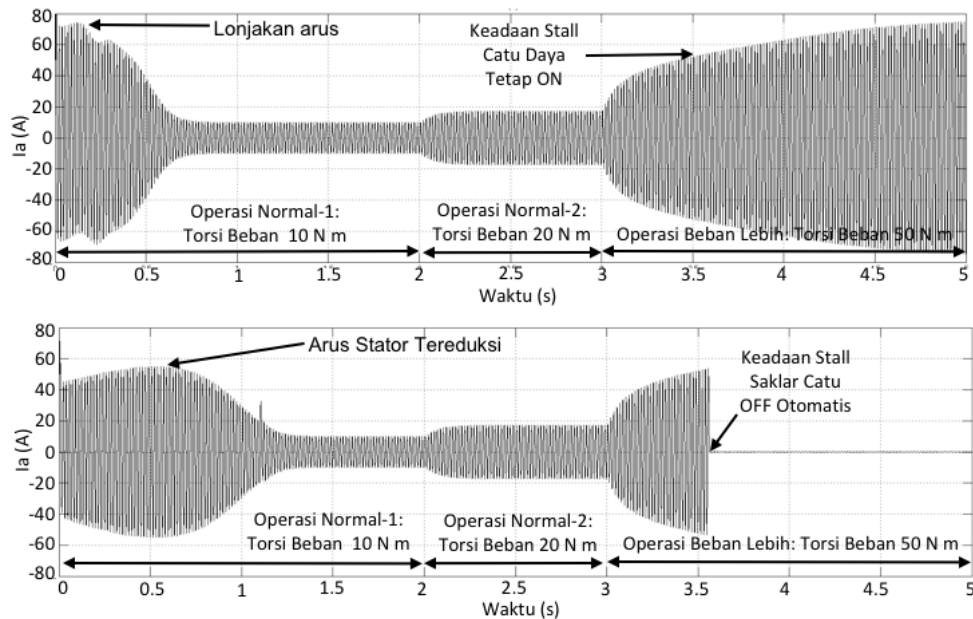
Gambar 15. Contoh Karakteristik Tradisional Motor Induksi Tiga Fase:
(a) Karakteristik Torsi Elektromagnetik versus Slip (Kiri), dan
(b) Karakteristik Arus Stator Versus Slip (kanan)

Pada praktik ini, karakteristik motor induksi tiga fase akan ditampilkan dengan menggunakan pendekatan dinamis, yakni semua besaran motor disajikan dalam fungsi waktu. Berikut ini adalah contoh karakteristik dinamis motor induksi tiga fase.

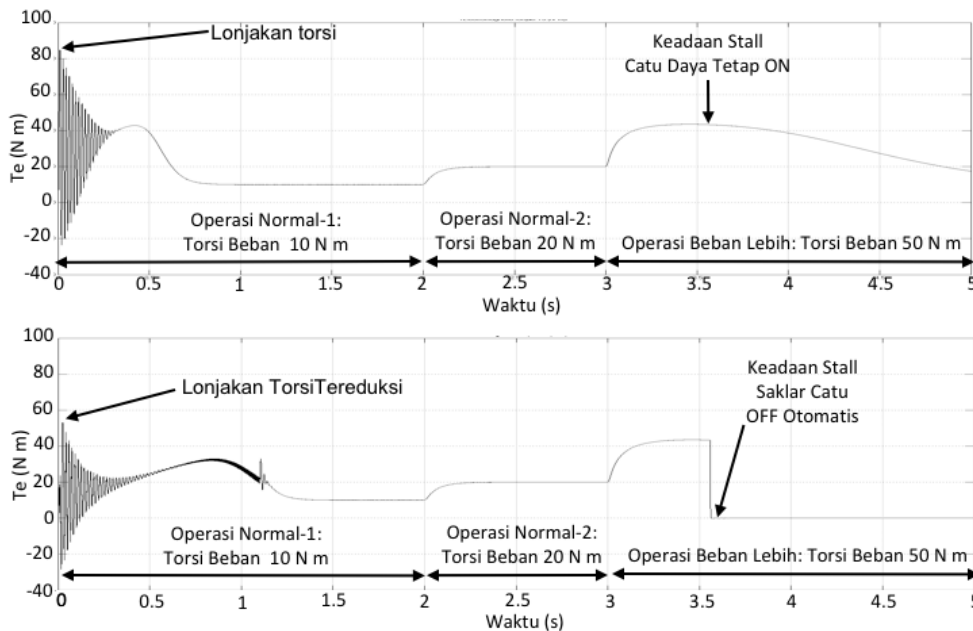


Gambar 16. Contoh Karakteristik Dinamis Motor Induksi Tiga Fase:
(a) Karakteristik Torsi Elektromagnetik versus Waktu (Atas), dan
(b) Karakteristik Arus Stator Versus Waktu (Bawah)

Perbandingan karakteristik dinamis motor induksi dengan catu langsung (*direct-on-line supplied*) dan catu melalui sistem kendali berkinerja tinggi, dengan beban bervariasi terdiri beban normal dan beban lebih (menimbulkan gejala *stall*), dapat divisualisasikan seperti pada Gambar 17 dan Gambar 18 berikut ini.



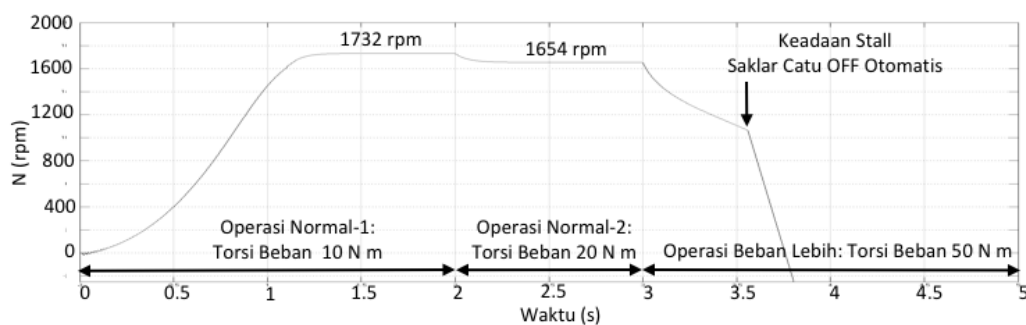
Gambar 17. Perbandingan Karakteristik Dinamis Arus Stator Motor Induksi 3-Fase Dicu Secara Langsung (Atas) dan Dicu Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi Mode *Soft-start* Cepat (Bawah) Untuk Motor Jenis 3HP



Gambar 18. Perbandingan Karakteristik Dinamis Torsi Motor Induksi 3-Fase Dicu Secara Langsung (Atas) dan Dicu Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi Mode *Soft-start* Cepat (Bawah) Untuk Motor Jenis 3HP

Berdasarkan Gambar 17 dan Gambar 18 dapat diinterpretasikan bahwa sistem kendali telah berhasil melakukan pengaturan tegangan catu sehingga dapat mereduksi lonjakan arus stator dan torsi elektromagnetik saat motor melakukan *start-up*, dalam hal ini sistem kendali *soft-start* telah bekerja dengan baik pada kondisi transien. Setelah mencapai *steady-state*, pada kondisi beban lebih (keadaan *stall*), untuk catu langsung tanpa sistem kendali berkinerja tinggi (Gambar 17 atas), arus motor terus naik karena tegangan tidak dimatikan sehingga dapat merusak belitan stator. Sedangkan untuk motor yang dikendalikan dengan sistem kendali berkinerja tinggi, saat terjadi *stall*, sistem secara otomatis mematikan catu daya motor sehingga motor terhindar dari kerusakan bagian statornya.

Perhatikan Gambar 17 bawah dan Gambar 18 bawah! Untuk jenis motor 3 HP, selama kondisi *steady-state* sampai $t=2$ s, motor berjalan normal dengan beban sebesar 10 N m. Pada kondisi sesaat setelah $t=2$ s, motor diberi gangguan pertama yakni penambahan torsi beban menjadi 20 N m, dan oleh karena torsi ini masih di bawah torsi maksimum maka motor berjalan dengan normal. Selanjutnya, pada kondisi sesaat setelah $t=3$ s motor diberi gangguan kedua dengan torsi beban sebesar 50 N m, dan oleh karena nilai torsi bebannya melebihi nilai torsi maksimum, maka motor mengalami *stall*. Saat motor mulai mengalami *stall*, sistem kendali secara otomatis mematikan catu tegangan yang ditunjukkan oleh arus stator dan torsi elektromagnetik yang bernilai 0. Kondisi ini menunjukkan bahwa sistem kendali motor memiliki kinerja tinggi. Selanjutnya, perhatikan grafik respons waktu kecepatan putar rotor berikut ini!



Gambar 19. Karakteristik Dinamis Kecepatan Putar Rotor Dicatu Menggunakan Sistem Kendali Berkinerja Tinggi Mode *Soft-start* Cepat Untuk Motor Jenis 3HP

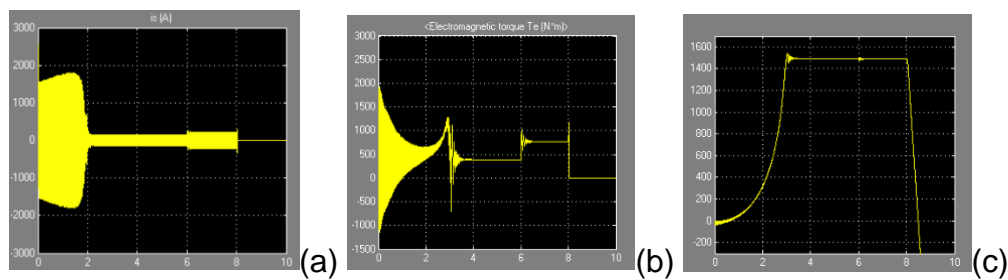
Dari Gambar 19, dapat diinterpretasikan, setelah mencapai *steady-state* motor beroperasi normal dengan beban 10 N m. Kondisi normal juga berlangsung ketika sesaat setelah $t=2$ s, motor memperoleh tambahan torsi beban menjadi 20 N m. Namun, sesaat setelah $t=3$ s, ketika motor memperoleh torsi beban 50 N m, motor mengalami *stall* sehingga kecepatan putar motor menurun secara drastis dan sebelum berhenti berputar, sistem kendali mematikan secara

otomatis catu tegangan motor. Kinerja tinggi dari sistem kendali ini telah ditunjukkan oleh kemampuannya dalam mereduksi lonjakan arus dan torsi *starting* serta dalam mengantisipasi terjadinya *stall*.

C. TUGAS PENDAHULUAN

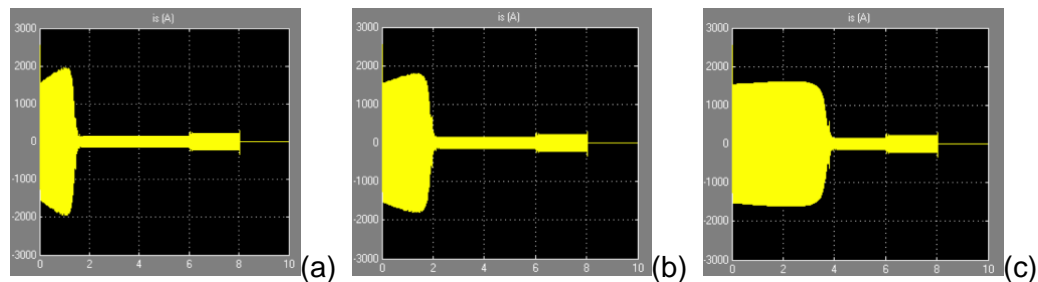
Agar kegiatan praktik dapat dilaksanakan dengan baik, mahasiswa wajib menyusun tugas pendahuluan dan diserahkan kepada dosen pengampu/asisten praktik paling lambat satu hari sebelum praktik dilaksanakan. Tugas pendahuluan yang harus dikerjakan adalah sebagai berikut.

1. Jelaskan pengertian sistem kendali berkinerja tinggi yang digunakan dalam praktik ini.
2. Apa yang dimaksud dengan *soft-starter*? Kemukakan prinsip pengendalian motor induksi untuk mereduksi lonjakan arus dan torsi saat motor melakukan *start-up*.
3. Apa yang dimaksud dengan *stall detector*? Uraikan penjelasan prinsip pengendalian motor induksi untuk melindungi motor dari keadaan *stall*.
4. Apa yang dimaksud dengan konfigurasi anti paralel (*back to back*) dari *thyristor*? Gambarkan konfigurasi tersebut pada sistem tegangan satu fase!
5. Jika V_a , V_b , V_c berturut-turut menunjukkan notasi tegangan sumber fase a, fase b, dan fase c pada sistem 3-fase, α menunjukkan sudut pemucuan *thyristor*, p_1 , p_2 , p_3 , p_4 , p_5 , dan p_6 berturut-turut adalah pulsa pemacu *thyristor* T_1 , T_2 , T_3 , T_4 , T_5 dan T_6 , gambarkan dalam fungsi waktu tegangan 3-fase dan urutan pulsa yang diperlukan untuk memicu semua *thyristor* dengan urutan yang benar. Selanjutnya, gambarkan rangkaian pengendali tegangan tiga fase sesuai urutan pemucuan yang telah dirancang tersebut untuk mencatu motor induksi tiga fase dengan konfigurasi *star*.
6. Gambarkan diagram blok sistem kendali motor induksi berkinerja tinggi yang dilengkapi dengan unit *soft-starter* dan *stall detector*
7. Apa makna karakteristik motor induksi berkinerja tinggi berikut ini!



Gambar 20. Karakteristik Motor Induksi 3-Fase Untuk Tugas Nomor 7

8. Perhatikan karakteristik motor induksi berikut ini:



Gambar 21. Karakteristik Arus Motor Induksi 3-Fase Untuk Tugas Nomor 8

Berdasarkan gambar 21, lakukan analisis untuk menentukan karakteristik mana yang menunjukkan kinerja sistem kendali terbaik!

9. Pelajari Panduan Pengoperasian Simulator Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi dengan baik! Lakukan pengaturan parameter untuk motor jenis 150 HP. Jalankan simulasi, dan cetak hasilnya pada lembar tugas Saudara! Pastikan anda telah dapat mengoperasikan simulator dengan baik!

D. ALAT DAN BAHAN PRAKTIK

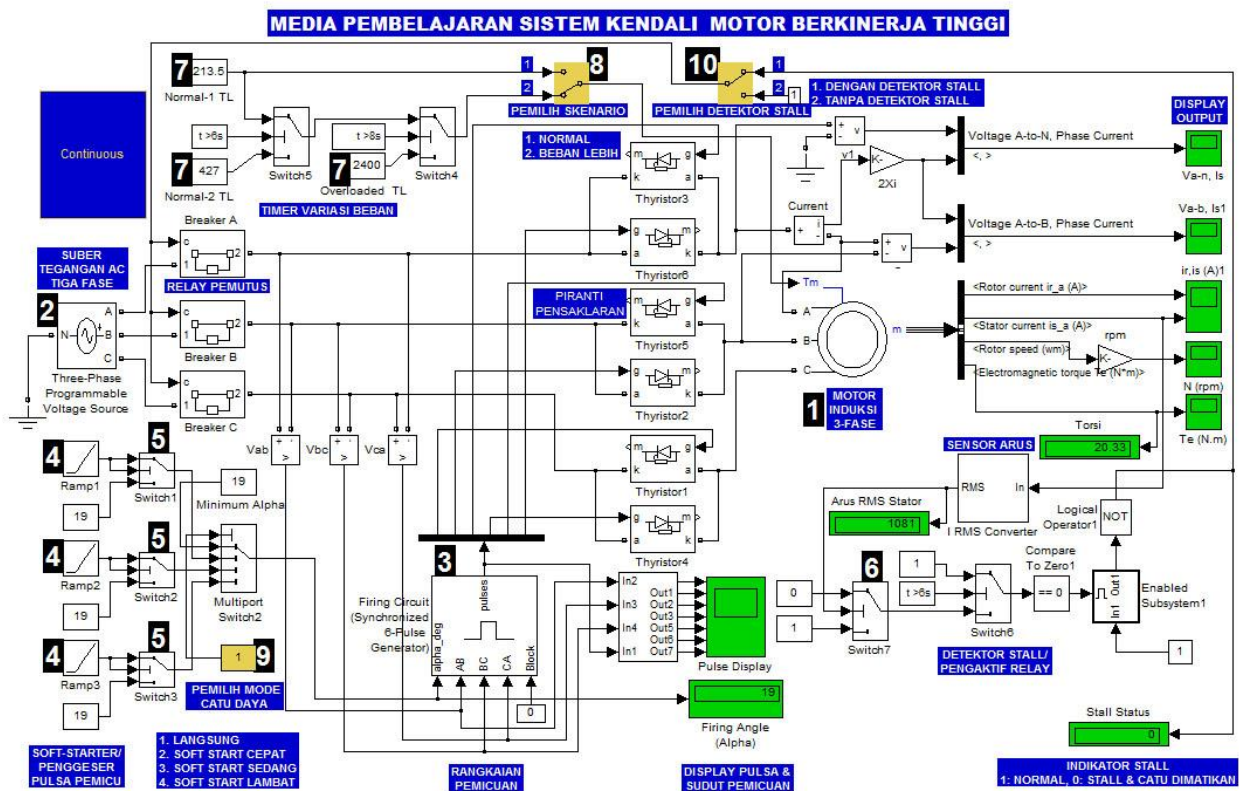
Praktik ini bersifat simulatif yang memerlukan dukungan perangkat keras dan perangkat lunak sebagai berikut.

1. PC/Laptop dengan: frekuensi *clock* prosesor minimal 1,8 GHz, kapasitas memori internal 2GB, kapasitas *harddisk* minimal 500 GB, resolusi monitor 1366x768 dpi (*dot per inch*)
2. Sistem Operasi: Windows 7 di dalamnya terpasang program MATLAB minimal Versi 7 yang dapat menjalankan SIMULINK
3. Simulator Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi dalam bentuk *file* model dari SIMULINK dengan nama *motor_control.mdl* yang dapat diperoleh dengan *download* dari *link*: http://muchlas.ee.uad.ac.id/downloads/motor_control.zip
4. Buku Panduan Pengoperasian Simulator Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi, yang dapat diperoleh dengan *download* dari *link*: http://muchlas.ee.uad.ac.id/downloads/motor_control.zip
5. Bahan praktik virtual berupa model mesin induksi tiga fase sebanyak tiga buah yakni jenis 150 HP (mewakili daya tinggi), 50 HP (mewakili daya sedang), dan 5,4 HP (mewakili daya rendah).

6. Instrumen virtual berupa *display* untuk mengukur dan menayangkan: tegangan dan arus stator, kecepatan putar rotor, dan torsi elektromagnetik.

E. PROSEDUR EKSPERIMEN

1. Siapkan komputer/laptop dengan sistem operasi dan aplikasi sesuai spesifikasi yang diperlukan ditambah aplikasi Word terpasang di dalamnya.
2. Pastikan anda memiliki folder C:\work dalam komputer/laptop yang digunakan, dan file motor_control.mdl terdapat di dalamnya.
3. Jalankan program Matlab dan ubahlah *current directory* menjadi **C:\work**.
4. Jalankan simulator dengan mengetik **motor_control** melalui *Command Window* diteruskan menekan **Enter/Return** sehingga muncul tampilan seperti berikut ini!



5. Untuk praktik pertama, pilih terlebih dahulu motor jenis 5,4 HP dan lakukan pengaturan parameter yang sesuai seperti pada Buku Panduan Pengoperasian Simulator Sistem Kendali Motor Berkinerja Tinggi.
6. Untuk memastikan sistem kendali telah bekerja dengan baik, tampilkan bentuk gelombang arus stator, tegangan fase-ke-fase, dan tegangan eksitasi salah satu fase, untuk nilai sudut pemucuan 150°, 140°, 130°, 120°, 110°, 100°, 90°, 80° dan 19°.

7. Pindahkan tampilan bentuk gelombang untuk setiap sudut pemicuan pada langkah 6 di atas ke dalam format Word agar anda mudah dalam menganalisisnya!
8. Lakukan analisis bentuk gelombang untuk memastikan sistem kendali tegangan dengan komponen *thyristor* terpicu telah bekerja dengan baik. Analisis dilakukan dengan membandingkan tampilan bentuk gelombang yang diperoleh dengan hasil analisis dari Hamed & Chalmers (1990) dan komputasi oleh Muchlas (1998). Jika hasil perbandingan tersebut memiliki kemiripan yang tinggi maka dapat dinyatakan sistem telah bekerja dengan baik.
9. Jika sistem kendali telah dapat dinyatakan bekerja dengan baik, kembalikan nilai minimum alpha ke nilai 19 dengan *double click* pada blok *Minimum Alpha* dan isikan parameter *Constant value* dengan angka 19 (menunjukkan motor dikendalikan oleh tegangan catu yang dipicu oleh *thyristor* dengan sudut alfa 19° listrik).
10. Ubah kembali waktu simulasi menjadi 10 s.
11. Pilih skenario operasi normal dengan menempatkan pemilih skenario ke posisi 1.
12. Jalankan simulasi dan tunggu hingga prosesnya selesai.
13. Pastikan anda telah memperoleh tampilan karakteristik dinamis arus stator, torsi elektromagnetik dan kecepatan putar stator dalam fungsi waktu.
14. Pindahkan tampilan-tampilan tersebut ke format Word agar anda mudah dalam menganalisisnya.
15. Pilih skenario operasi beban lebih (*overloaded*) dengan menempatkan pemilih skenario ke posisi 2, dan lakukan kembali langkah 12 sampai dengan langkah 14.
16. Ulangi langkah 5 sampai dengan langkah 15 untuk motor jenis 50 HP dan 150 HP.

F. TUGAS AKHIR

1. Lakukan analisis terhadap karakteristik dinamis arus stator, torsi elektromagnetik, dan kecepatan putar rotor untuk skenario operasi normal dan skenario operasi beban lebih ketiga jenis motor yang digunakan untuk praktik.
2. Untuk ketiga jenis motor yang digunakan, bagaimana pengaruh pemilihan mode catu daya terhadap kinerja motor?
3. Untuk setiap jenis motor, dari empat jenis mode catu daya yang digunakan, mode catu mana yang memberikan kinerja motor terbaik? Mengapa hal itu dapat terjadi?

DAFTAR PUSTAKA

- Dewan, S. B., Slemon, G. R., & Straughen, A. (1984). *Power Semiconductor Drives*. Toronto: John Wiley & Sons.
- Eaton Corporation. (2013). Choosing between a soft starter and a variable frequency drive to t your application. *Industry Application IA04003002E*, 1–4. Retrieved from http://www.eaton.com/ecm/groups/public/@pub/@eaton/@corp/documents/content/pct_1110244.pdf
- Hamed, S. A., & Chalmers, B. J. (1990). Analysis of variable-voltage thyristor controlled induction motors. *IEE Proceedings*, 137(3), 184–193.
- Mackay, W. (2004). Compressor induction motor stall and rotation detection using microcontrollers. *Application Note AN2149 Freescale Semiconductor, Inc.*, 1–36. Retrieved from <https://www.nxp.com/docs/en/application-note/AN2149.pdf>
- Mohan, N., Undeland, T. M., & Robbins, W. P. (2003). *Power Electronics: Converters, Applications and Design* (Third Edit). Hoboken, Nj: John Wiley & Sons, Inc.
- Muchlas. (1998). *Sistem kendali soft-start motor induksi tiga fase berbasis mikrokontroler*. Universitas Gadjah Mada. Retrieved from http://etd.repository.ugm.ac.id/index.php?mod=penelitian_detail&sub=PenelitianDetail&act=view&typ=html&buku_id=3509
- ON-Semiconductor. (2015, August). AMIS-30623/AMIS-30624/ NCV70627 stall detection. *Application Note AND8471/D*, 1–30. Retrieved from <http://www.onsemi.com/pub/Collateral/AND8471-D.PDF>
- Rahman, M. F., Patterson, D., Cheok, A., & Betz, R. (2011). Motor drives. In M. H. Rashid (Ed.), *Power electronics handbook* (3rd ed., pp. 915–991). Burlington, MA: Elsevier Inc.
- Rockwell Automation. (2014). When to use a soft starter or an ac variable frequency drive. *Rockwell Automation Publication 150-WP007A-EN-P*, 1–22. Retrieved from http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/wp/150-wp007_-en-p.pdf
- Smith, K. C. A., & Alley, R. E. (1992). *Electrical Circuits: An Introduction*. Cambridge, USA: the Press Syndicate of the University of Cambridge.
- STMicroelectronics. (2013, December). L9942 back emf stall detection algorithm. *Application Note AN3327*, 1–22. Retrieved from http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/application_note/ff/6e/b3/3a/9d/ef/4d/56/CD00294593.pdf/files/CD00294593.pdf/jcr:content/translations/en.CD00294593.pdf
- Unsworth, P. J. (1988). *US4767975 A*. United State Patent.