Analisis Hemat Energi Pada *Inverter* Sebagai Pengatur Kecepatan Motor Induksi 3 Fasa

Bambang Prio Hartono dan Eko Nurcahyo
Program Teknik Listrik Diploma Tiga, Institut Teknologi Nasional Malang
E-mail: bambang_prio@fti.itn.ac.id

***Abstrak*—Salah satu penunjang dalam kehidupan manusia modern adalah listrik, dimana listrik sudah menjadi kebutuhan primer untuk berkatifitas dan berproses produksi. Karena kebutuhan listrik yang semakin meningkat dan sumber daya listrik kurang memadai, maka dibutuhkan cara untuk menghemat energi, menganalisa saving energi pengendalian putaran motor induksi 3 fasa menggunakan inverter kontrol tegangan dan frekuensi yang kemudian dibandingkan dengan pengendalian menggunakan autotrafo, Hasilnya menunjukkan bahwa pada pengendalian kecepatan motor induksi pengerak mesin extruder menggunakan inverter energi yang dibutuhkan lebih kecil, saving energinya 65,61 kWh dalam pengoperasian 6jam/hari karena kebutuhan kecepatanya hanya 500-600 rpm.**

***Kata kunci*—Motor Induksi, Inverter kontrol tegangan dan frekuensi, pengendalian kecepatan, putaran rendah.**

I. PENDAHULUAN

Saat tegangan kecil pengendalian menggunakan inverter motor masih bisa berputar dan pengendalian menggunakan autotrafo motor tidak bisa berputar saat berbeban. Dalam perkembangan teknologi yang semakin pesat harus didukung dengan ketersediaan energi yang cukup. Disisi lain ketersediaan energi yang ada semakin menipis. Salah satunya adalah energi listrik. Penghematan energi adalah salah satu untuk mengatasi masalah tersebut. Motor listrik memegang peranan yang sangat penting baik dalam bidang industri maupun dalam kehidupan sehari-hari. Penggunaan motor listrik dalam industri pada umumnya untuk menyediakan kerja mekanik, sedangkan dalam kehidupan sehari-hari motor listrik digunakan sebagai bagian dari peralatan rumah tangga misalnya pompa air, mesin cuci, lemari es dan sebagainya. Karena motor AC memiliki keunggulan dalam hal kesederhanaan dan murahnya biaya perawatan sehingga jenis motor ini banyak dipakai dilingkungan industri maupun rumah tangga. Pengendalian kecepatan putaran motor AC dapat dilakukan dengan beberapa cara diantaranya dengan kendali tegangan dan frekuensi.

Inverter adalah konverter DC ke AC dengan tegangan dan frekuensi keluaran dapat diatur sehingga motor AC dapat dikendalikan dengan fleksibel. Saat ini *inverter* mulai sering di gunakan sebagai pengendalian kecepatan dan starting motor induksi. Di *PT.Suprama Sidoarjo* ada beberapa *inveter* yang di gunakan untuk mengendalikan kecepatan motor yang berfungsi sebagai penggerak mesin *Extruder*. Karena kelebihan *inverter* yang dapat mengatur kecepatan motor sesuai dengan kebutuhan beban. Dengan perubahan tegangan dan frekuensi pada keluaran *inverter* apakah berpengaruh pada inputan *inverter* yang bisa menghemat daya yang digunakan *(saving enegy)*.

Dengan bantuan software MATLAB kita bisa menganalisa *saving energy* dari *inverter* dengan cara membuat blok simulasi dan mengatur kecepatan motor dengan merubah frekuensinya dan tegangannya. Permasalahan yang timbul adalah yang pertama bagaimana cara untuk mengetahui *saving energy* pada saat pengaturan kecepatan motor induksi tiga fasa menggunakan *inverter*, kedua bagaimana mengetahui tegangan masuk, arus dan cos φ pada saat tanpa inverter, ketiga bagaimana mengetahui tegangan masuk, arus dan cos φ dan mengatur kecepatan putaran motor tiga fasa pada saat menggunakan inverter, keempat bagaimana mengetahui tegangan keluaran dari inverter.

Tujuan penelitian untuk menganalisa *saving energy* pada *inverter* sebagai pengatur kecepatan motor induksi tiga fasa, ruang lingkup kajian analisis hanya dilakukan pada motor tiga fasa rotor sangkar, BRANCO 22KW, 380/660 (Δ/Y) Volt, 50 Hz, cosφ 0,86, 1470 rpm, a*utotrafo* hanya sebagai pembanding saja, menunjukkan hasil simulasi yaitu: bentuk gelombang tegangan, arus, torsi, kecepatan, pada pengendalian tegangan dan frekuensi.

II. DASAR TEORI

Motor arus bolak-balik (Motor AC) adalah suatu mesin yang berfungsi untuk mengubah tenaga listrik menjadi tenaga mekanik atau tenaga gerak, dimana tenaga gerak ini berupa perputaran pada poros motor. Salah satu jenis motor AC ini adalah motor induksi atau motor tak serempak. Dinamakan motor tak serempak (*asynchrone*) karena putaran poros motor tidak sama dengan putaran medan *fluks* magnet stator. Dengan kata lain, bahwa antara putaran rotor dan putaran *fluks* magnet terdapat selisih putaran yang disebut *slip*.

Motor induksi *polyphase* banyak dipakai dikalangan industri. Ini berkaitan dengan beberapa keuntungannya, yaitu:

1. Sangat sederhana dan daya tahan kuat (konstruksi hampir tak pernah mengalami kerusakan, khususnya tipe rotor sangkar bajing).
2. Harga relatif murah dan perawatan mudah.
3. *Efisiensi* tinggi. Pada kondisi berputar normal, tidak dibutuhkan sikat dan karenanya rugi daya yang

ditimbulkan dapat dikurangi (khususnya motor induksi rotor belitan).

A. Prinsip Kerja Motor Induksi [1]

Berputarnya rotor pada motor induksi ditimbulkan oleh adanya medan putar yang dihasilkan dalam kumparan statornya. Medan putar ini akan terjadi apabila kumparan stator dihubungkan dengan suatu sumber tegangan tiga fasa. Prinsip kerjanya diuraikan sebagai berikut:

1) Apabila sumber tegangan 3 fasa dipasang pada kumparan stator akan timbul medan putar dengan kecepatan:

$$n_s = \frac{120\,f}{p}\ \text{rpm} \quad (1)$$

2) Medan putar stator tersebut akan memotong batang konduktor pada rotor sehingga pada kumparan rotor timbul tegangan induksi (GGL Induksi).
3) Karena kumparan rotor merupakan rangkaian tertutup, maka akan mengalir arus (*I*). Kawat penghantar (kumparan rotor) yang dialiri arus yang berada dalam medan magnet akan menimbulkan gaya (*F*) pada rotor.
4) Bila kopel mula yang dihasilkan oleh gaya (*F*) pada rotor cukup besar untuk memikul kopel beban, maka rotor akan berputar searah dengan medan putar stator.
5) Seperti halnya telah dijelaskan bahwa tegangan induksi akan timbul karena adanya terpotongnya batang konduktor (rotor) oleh medan putar stator. Artinya agar tegangan terinduksi diperlukan adanya perbedaan relatif antara kecepatan medan putar stator (n_s) dan kecepatan medan putar rotor (n_r).
6) Perbedaan kecepatan antara n_r dan n_s disebut slip (*S*) dinyatakan dengan:

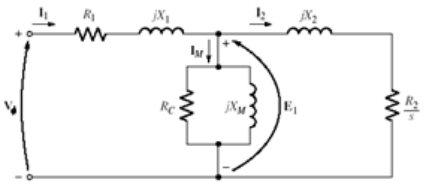
$$S = \frac{n_s - n_r}{n_s} x100\% \quad (2)$$

7) Bila $n_r = n_s$ tegangan tidak akan terinduksi dan arus tidak mengalir pada kumparan jangkar rotor, dengan demikian tidak dihasilkan kopel. Kopel motor ditimbulkan apabila n_r lebih kecil dari n_s.
8) Dilihat dari cara kerjanya motor induksi disebut juga motor tak serempak atau asinkron.

B. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi[1]

Kerja motor induksi seperti juga kerja pada transformator adalah berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik. Oleh karena itu motor induksi dipandang sebagai transformator yang mempunyai ciri-ciri khusus, yaitu:

1) Stator sebagai sisi primer.
2) Rotor sebagai sisi sekunder yang penghantar-penghantarnya dihubung-singkat dan berputar.
3) Kopling antara sisi primer dan sisi sekunder dipisahkan oleh celah udara (*air gap*).



Gambar 1. Rangkaian Ekivalen Motor Induksi[1].

Rangkaian ekivalen memperlihatkan bahwa daya keseluruhan yang dialihkan pada celah udara dari stator (masukan daya ke rotor) adalah:

$$P_r = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} \quad (3)$$

Dan rugi tembaga rotor,

$$P_r = 3I_r^2 R_r \quad (4)$$

Maka daya mekanis yang dibangkitkan oleh motor induksi,

$$P_m = P_r - P_{cu} = 3I_r^2 \frac{R_r}{s} - 3I_r^2 R_r = 3I_r^2 R_r \frac{(1-s)}{s} \quad (5)$$

$$P_m = T\omega_r = T\omega_s(1-s) \quad (6)$$

dimana:

T = Torsi Motor dalam N-m

ω_r = Kecepatan Rotor dalam rad/detik

ω_s = Kecepatan Stator dalam rad/detik

Sehingga diperoleh,

$$T = \frac{3}{\omega_s} I_r^s \frac{R_r}{s} \quad (7)$$

$$I_r = \frac{V_s}{\sqrt{(R_s + \frac{R_r}{s})^2 + (X_s + X_r)^2}} \quad (8)$$

Dalam analisa rangkaian ekivalen sering disederhanakan dengan menghilangkan resistansi (R_c)

$$I_r = \frac{3}{\omega_s} \frac{V_s^2}{\sqrt{(R_s + \frac{R_s}{s})^2 + (X_s + X_r)^2}} \frac{R_s}{s} \quad (9)$$

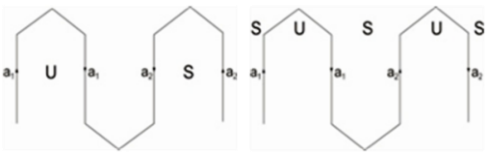
$$P_{in} = \sqrt{3}\, V_L I_L \cos\varphi \quad (10)$$

C. Pengaturan Putaran[3]

Motor induksi pada umumnya berputar dengan kecepatan konstan, mendekati putaran sinkronya. Meskipun demikian pada penggunaan tertentu di kehendaki juga adanya pengaturan putaran. Pengaturan motor induksi memerlukan biaya yang agak tinggi. Biasanya pengaturan ini dapat dilakukan dengan beberapa cara yaitu dengan mengubah jumlah kutub motor, mengubah frekuensi jala-jala, mengatur tegangan jala-jala, dan mengatur tahanan luar.

D. Mengubah Jumlah Kutub Motor

Karena $n_s = 120f / p$, maka perubahan kutub (p) atau frekuensi (f) akan mempengaruhi putaran. Jumlah kutub dapat diubah dengan merencanakan kumparan stator sedemikian rupa sehingga dapat menerima tegangan masuk pada posisi kumparan yang berbeda-beda. Biasanya diperoleh dua perubahan kecepatan sinkron dengan mengubah jumlah kutub dari 2 menjadi 4, seperti terlihat pada Gambar 2.



Gambar 2. Perubahan Kutub[3].

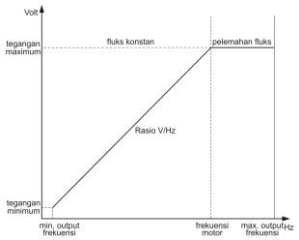
E. Mengubah Frekuensi Jala-Jala

Pengaturan putaran motor induksi dapat dilakukan dengan mengubah-ubah harga frekuensi jala. Pengendalian model ini biasanya di barengi dengan pengaturan tegangan masuk yang sebanding dengan frekuensi tersebut, karena untuk mendapatkan fluks yang konstan, dimana:

$$T = \phi I_2 \tag{11}$$

$$\phi = \frac{V}{f} \tag{12}$$

Berdasarkan rumus-rumus diatas, dapat dikatakan untuk menjaga agar fluksi motor tetap konstan dapat dilakukan dengan menjaga agar perbandingan *V/f* konstan, perbandinagnya terlihat pada Gambar 3. Dan dengan didapat Ø yang konstan, maka jelas torque sekarang hanya merupakan fungsi dari arus rotor saja (I_2).

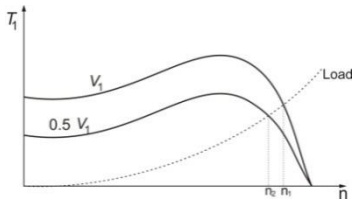


Gambar 3. Perbandingan Frekuensi dan Tegangan[10].

F. Mengatur Tegangan Jala-jala

$$T = \frac{3}{\omega}(v_1)^2 \frac{Sa^2 R_2}{(a^2 R_2)^2 + S^2 (a^2 X_2)^2} \tag{13}$$

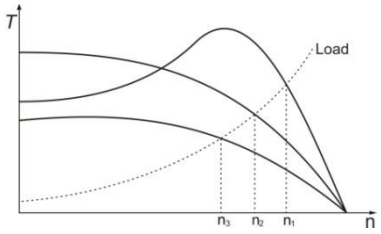
Dari pers. (13) kopel motor induksi diatas diketahui bahwa kopel sebanding dengan pangkat dua tegangan yang diberikan. Untuk karakteristik beban seperti terlihat pada Gambar 4, kecepatan motor akan berubah dari n_1 ke n_2 untuk tegangan masuk setengah tegangan semula. Cara ini hanya menghasilkan pengaturan putaran yang terbatas (daerah pengaturan sempit).



Gambar 4. Grafik Karateristik Perubahan Kecepatan[3].

G. Pengaturan Tahanan Luar

Tahanan luar motor induksi rotor belitan dapat diatur, dengan demikian dihasilkan karakteristik kopel kecepatan yang berbeda-beda seperti pada Gambar 5.



Gambar 5. Grafik Karakteristik Kopel Kecepatan[3].

Putaran akan berubah dari n_1 ke n_2 dan n_2 ke n_3 dengan bertambahnya tahanan luar yang dihubungkan ke rotor.

H. Inverter[3]

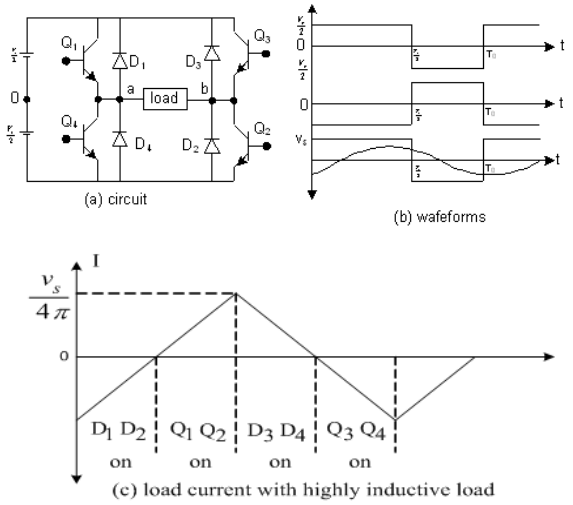
Yang dimaksud dengan inverter disini adalah suatu rangkaian yang mampu mengubah tegangan dc menjadi ac. Ada dua jenis inverter yang umum digunakan pada sistem tenaga listrik yaitu:

1) Inverter dengan frekuensi dan tegangan keluaran yang konstan (*Constant Voltage Constant Frequency*)
2) Inverter dengan frekuensi dantegangan keluaran yang berubah-ubah.

Secara umum inverter dibagi menjadi dua bagian yaitu: inverter satu fasa dan inverter tiga fasa. Peralatan elektronika daya yang dipakai untuk inverter, antara lain: *bipolar junction transistors* (BJT_s), *metal oxide semiconductor field-effect transistors* (MOSFET), *insulated-gate bipolar transistor* (IGBT), *metal oxide semiconductor-controlled thyristors* (MCT_s), *static induction transistors* (SIT_s), *gate-turn-off thyristors* (GTO_s). Pemakaian peralatan tersebut dipilih didasarkan pada jenis penerapannya. Inverter biasanya memakai sinyal kontrol PWM untuk menghasilkan tegangan output ac. Inverter dikatakan sumber tegangan (*Voltage fed Inverter)* jika tegangan inputnya dibuat konstan.dan dikatakan sumber arus (*Current Fed Inverter)* jika arus inputnya dijaga konstan. Jika tegangan inputnya merupakan tegangan terkendali atau tegangan inputnya merupakan tegangan yang bisa diatur, maka inverter ini bisa disebut *variable dc linked inverter.*

I. Single Phase Full Bridge Inverter

Single Phase full Bridge Inverter ditunjukkan pada Gambar 6*a*. Inverter ini terdiri atas empat chopper. Ketika transistor Q_1 dan Q_2 dihidupkan secara bersama, tegangan output V_s melalui beban. Jika transistor Q_2 dan Q_3 dihidupkan secara bersamaan, maka tegangan beban menjadi $-V_s$. Bentuk tegangan output ditunjukan dalam Gambar 6*b*.

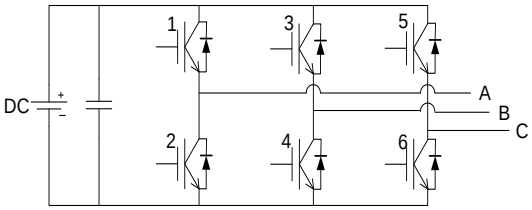


Gambar 6. Single Fasa Full Bridge Inverter [6].

J. Three Phase Inverter

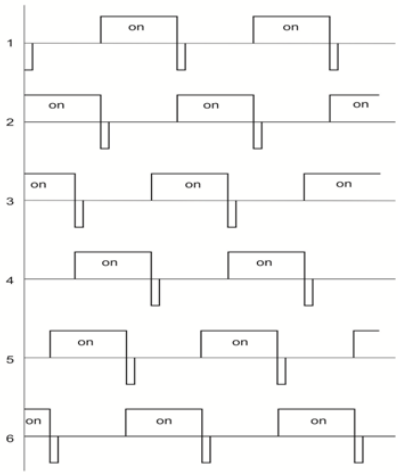
Inverter sumber tegangan 3 fasa adalah peralatan elektronik yang berfungsi untuk mengubah tegangan searah(DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) 3 fasa. Pada umumnya inverter 3 fasa bekerja dengan prinsip switched mode yang rangkaian dasarnya seperti terlihat pada Gambar

7. Saklar-saklar pada gambar tersebut bekerja sedemikian rupa, sehingga bentuk tegangan keluaran (A, B, &C) membentuk tegangan 3 fase.



Gambar 7. Rangkaian inverter tiga fasa dengan IGBT[6].

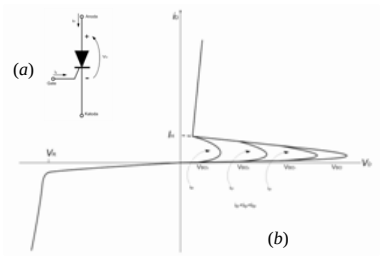
Kedudukan saklar-saklar yang berpasangan (1 dan 2, 3 dan 3, 5 dan 6) diatur sedemikian hingga setiap pasang tidak pernah bersama-sama ON ataupun sama-sama OFF. Artinya jika saklar 1 dalam keadaan ON, maka saklar 2 berada dalam keadaan OFF atau sebaliknya. Demikian pula untuk pasangan 3-4 dan 5-6. Pengaturan kombinasi pensaklaran ini dilakukan oleh sinyal PWM (*Pulse Width Modulation)*, model pentriggeran terlihat pada Gambar 8.



Gambar 8. Bentuk Pulsa Trigger PWM[6].

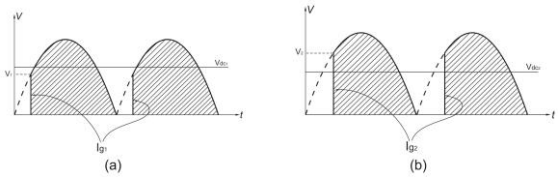
K. Silicon Controlled Rectifier (SCR) [3]

Simbol dan karakteristik SCR dapat dilihat Gambar 9. SCR (*Silicon Controlled Rectifier***)** adalah komponen elektronika daya yang digunakan sebagai penyearah yang dapat di kontrol. Prinsip kerja dari SCR sama dengan dioda, tetapi bedanya pada SCR ketika SCR dibias maju arus tidak dapat mengalir jika gerbang (*gate*) tidak dipicu atau di trigger.



Gambar 9. Simbol dan karakteristik SCR[3].

Pengaturan besarnya arus yang masuk pada *gate* dengan mengatur sudut penyalaan (firing) SCR berupa besarnya sudut α. Besarnya sudut sulut akan mempengaruhi besarnya arus yang mengalir dari anoda ke katoda.



Gambar 11. Pengaruh Penyalaan Pada SCR[3].

Untuk tegangan I_{g1} tegangan penyalaanya adalah V_1, sehingga bentuk tegangan *output* yang terjadi adalah hanya pada bagian yang diarsir pada Gambar 11*a*. Harga rata-rata dari tegangan ini adalah tegangan searah V_{dc1}. Untuk I_{g2} tegangan penyalaannya adalah V_2, dan tegangan *output* yanga teerjadi dapat dilihat pada Gambar 11*b*, dengan tegangan searah V_{dc2}. Harga tegangan searah ini dapat dihitung dengan rumus matematika sebagai berikut:

$$V_{dc} = \frac{1}{T}\int_{T_1}^{T_2} V_t \, dt \qquad (14)$$

III. PEMODELAN

A. Motor Induksi 3 Fasa Dan Inverter 3 Fasa Simulink[8]

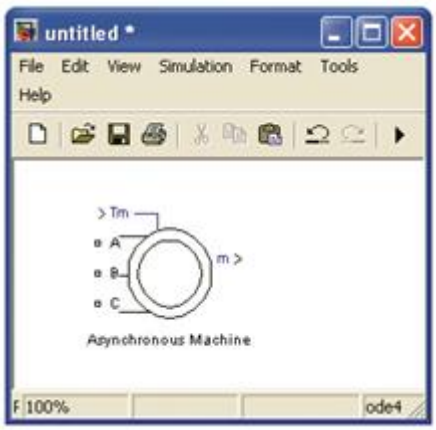
MATLAB merupakan suatu software yang sangat baik digunakan untuk menganalisa berbagai kebutuhan dalam bidang teknik. Didalam matlab terdapat dua bagian penting yaitu M-file yang berfungsi untuk menuliskan listing programnya dan Simulink yang digunakan untuk melakukan simulasi. Dengan menggunakan Simulink yang merupakan kesatuan dalam program tersebut kita dapat melakukan suatu pemodelan sistem kontrol atau suatu plant yang akan diatur. Hal itu dapat didesain dengan mengunakan blok-blok yang telah tersedia serta setting parameter-parameter akan menjadi lebih mudah. Blok-blok simulink dapat juga dibentuk dari persamaan matematika dengan mengunakan blok *transfer function* sehingga kita dapat menuliskan persamaan dan blok tersebut sesuai dengan parameter yang akan kita cari.

Gambar 12. Simulink Library pada MATLAB[8].

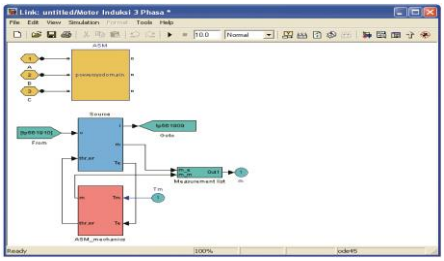
B. Pemodelan Motor Induksi 3 Fasa

Di dalam *library* Matlab sudah tersedia blok motor induksi 3 fasa (*asynchronous machine*), kita tinggal menginputkan parameter-parameter yang dibutuhkan oleh blok tersebut. Blok motor induksi ini dapat beroperasi sebagai motor atau generator, T_m pada gambar diatas adalah sebagai inputan untuk beban berupa nilai torsi mekanik.

Huruf A, B, C, merupakan inputan sumber tegangan 3 fasa, sedangkan untuk *m* di gunakan sebagai penghubung terhadap alat ukur untuk mengukur putaran, torsi motor, arus motor, arus rotor dll.



Gambar 13.Blok Motor Induksi 3 Fasa[7].

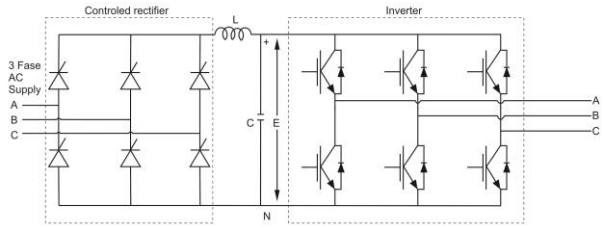


Gambar 14. Tampilan Model Fisik yang Ada didalam Blok Motor Induksi 3 Fasa[7]

Pada Gambar 14 merupakan tampilan blok motor induksi 3 fasa yang telah di masukkan kedalam fisik model komponen.

C. Pemodelan Pengendalian Motor Induksi 3 Fasa dengan Inverter

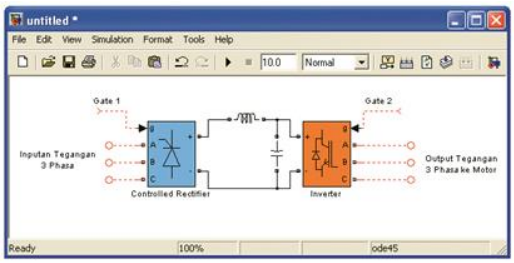
Secara umum pengendalian motor induksi 3 fasa menggunakan pengendalian inverter dapat dilihat pada Gambar 15.



Gambar 15.Rangkaian Inverter Kontrol Tegangan dan Frekuensi[6]

Pada pemodelan menggunakan Matlab Simulink, thyristor telah disediakan dalam bentuk *universal bridge* yang kita tinggal memindahkan ke halaman yang kita pakai buat menyusun rangkaian pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan inverter dan tinggal menginputkan parameter yang dibutuhkan. Gambar 16 memperlihatkan inverter 3 fasa dalam pemodelan matlab. Pada gambar tersebut inverter 3 fasa menggunakan universal bridge sebagai kontrol motor induksi 3 fasa dengan variablel kontrol tegangan dan frekuensi.

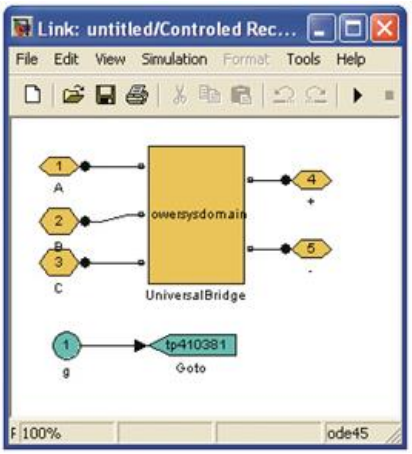
Pada bridge universal yang warna biru sebagai penyearah tegangan 3 fasa menjadi tegangan DC terkontrol (*controled rectifier*), yang nantinya pada *gate 1* (gerbang 1) akan di sulut dengan pulsa sebagai pemicuan sudut fasa.



Gambar 16. Rangkaian Blok Inverter 3 Fasa.

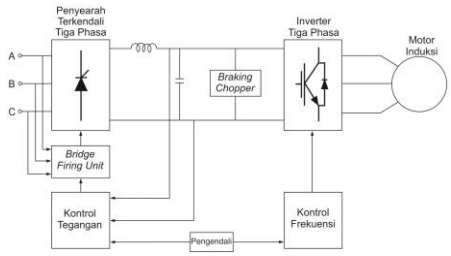
Sedangkan pada bridge universal yang berwarna orange sebagai inverter, yang nantinya pada *gate 2* (gerbang 2) akan di sulut dengan pulsa PWM (*Pulse Width Modulated*) sebagai kontrol kombinasi 3 fasa yang beda sudut sudut 120^o dan kontrol frekuensi.

Dalam blok *bridge universal* terdapat pemodelan persamaan sebagai berikut.



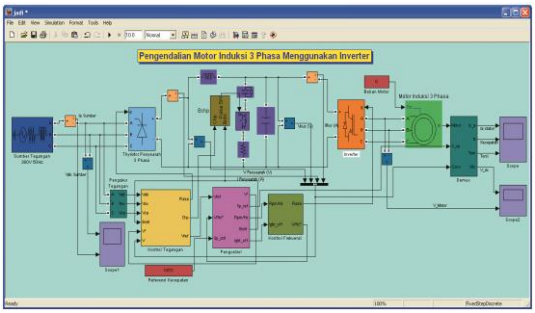
Gambar 17. Rangkaian Blok *Bridge Universal*[7]

Dimana A, B, C, atau 1, 2, 3 biasa sebagai inputan atau output tegangan 3 fasa bolak balik. Sedangkan pada 4 dan 5 juga bisa sebagai inputan atau outputan tegangan searah dimana 4 sebagai polarotas positif dan 5 sebagai polaritas negatif, penggunaanya tergantung pada kebutuhan. *Gate* sebagai inputan pulsa.



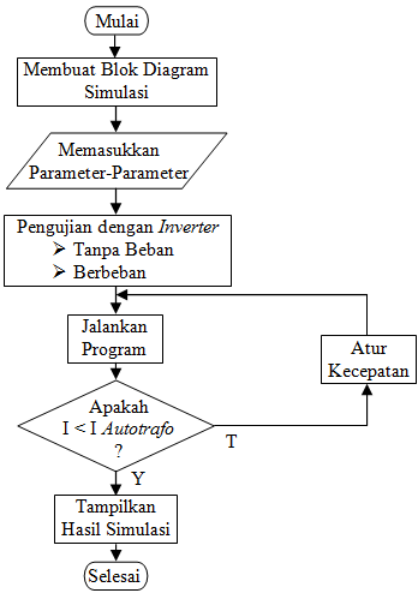
Gambar 18. Skematik Inverter Kontrol Tegangan dan Frekuensi[10]

Pada Gambar 18 merupakan skematik inverter dengan kontrol tegangan dan frekuensi yang akan dibuat dengan blok-blok di dalam simulink. Secara lengkap blok simulink dapat dilihat pada Gambar 19.



Gambar 19. Blok Inverter Kontrol Tegangan dan Frekuensi Secara Keseluruhan

Flowchart Analisa Pengendalian Motor Induksi 3 Fasa Dengan Inverter menggunakan Simulasi MATLAB *Simulink*

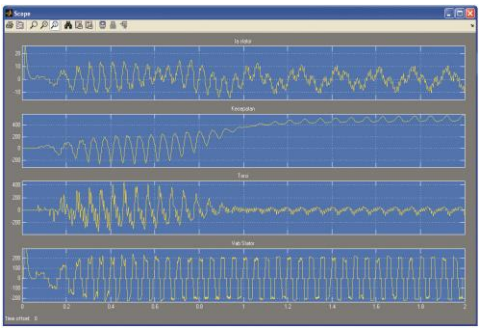


IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

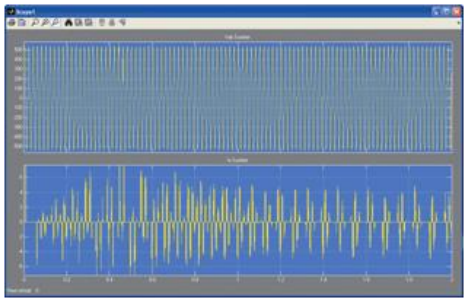
Dengan bantuan *Software MATLAB Simulik* maka simulasi pengendalian motor induksi tiga fasa dengan menggunakan *inverter* bisa dilakukan dengan membuat blok-blok rangkaian *inverter*. Dengan memasukkan parameter motor yang akan di uji. Kemudian mengeset kecepatan motor dengan merubah besar kecilnya tegangan dan frekuensi dengan *inverter* untuk mengetahui perubahan arus ketika motor dirubah kecepatanya. Kemudian program dijalankan (*running)*. Untuk mengetahui penghematan pengendalian ini dibandingkan dengan pengendalian menggunakan *autotrafo* dan besar daya motor akan dihitung yang kemudian untuk mengetahui energi yang dibutuhkan motor yang beroperasi selama 6 jam.

A. Hasil Simulasi Menggunakan Pengendalian Inverter Tanpa Beban

Gambar 20 menunjukkan besar arus stator = 11,23 A, kecepatan rotor = 524 dan torsi dalam kondisi tidak berbeban pada motor induksi tiga fasa dengan besar tegangan = 200 Volt. Gambar diatas juga menunjukkan kecilnya frekuensi karena terlihat jarak gelombang atau lebar gelombang cukup lebar.



Gambar 20. Gelombang I_a Stator, Kecepatan, Torsi, V_{ab} Stator *Inverter* Tanpa Beban Terhadap Waktu (*s*)

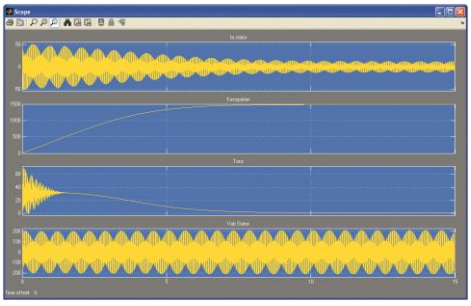


Gambar 21. Gelombang V_{ab} dan I_a pada inputan *Inverter* tanpa beban terhadap waktu (*s*)

Pada Gambar 21 menunjukkan tegangan pada inputan *inverter* = 530 Volt dan arusnya = 4,91 A, arus pada inputan lebih kecil dari pada arus pada sisi stator karena pengaruh perubahan tegangan pada sisi stator motor.

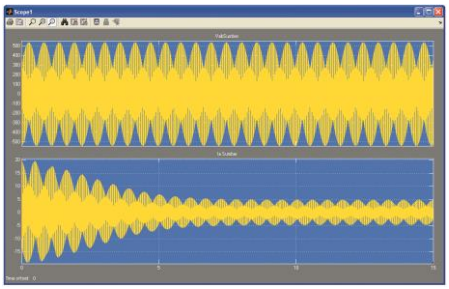
B. Hasil Simulasi Menggunakan Pengendalian Autotrafo Tanpa Beban

Stator *Autotrafo* Tanpa Beban Terhadap Waktu (*s*) Gambar 22 diatas menunjukkan besar arus stator = 11, 96 A, kecepatan rotor = 1490 dan torsi dalam kondisi tidak berbeban pada motor induksi tiga fasa dengan besar tegangan = 200 Volt.



Gambar 22. Gelombang I_a Stator, Kecepatan, Torsi, V_{ab}

Gambar diatas juga menunjukkan butuh waktu lebih lama untuk mencapai kondisi *steady state*, kurang lebih waktu yang di butuhkan sekitar 8 detik. Kecepatan motor juga tidak berubah banyak. Pada Gambar 23. diatas menunjukkan tegangan pada inputan *autotrafo* = 530 Volt dan arusnya = 4,47 A, besar arusnya pada inputan lebih kecil dari pada arus pada sisi stator, ini kurang lebih sama dengan pada pengendalian menggunakan *inverter*.



Gambar 23. Gelombang V_{ab} dan I_a Pada Inputan Autotrafo Tanpa Beban Terhadap Waktu (s)

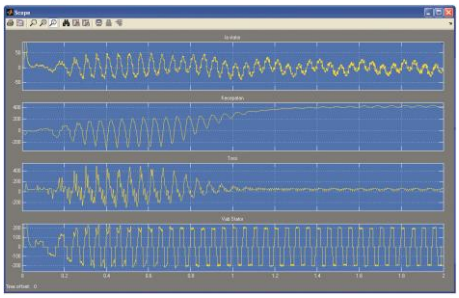
TABEL I
PERBANDINGAN ANTARA PENGENDALIAN INVERTER DAN AUTOTRAFO TANPA BEBAN

Tegangan Sumber (Volt)	V_{L-L} stator (Volt)		I stator (Ampere)		I inputan (Ampere)		Kecepatan (rpm)	
	Inverter	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*
530	200	200	11,23	11,96	4,91	4,47	524	1490
530	263	263	12,18	12,01	6,01	5,89	747	1495
530	295	295	12,26	12,07	6,95	6,72	895	1497
530	353	353	12,45	12,22	8,29	8,21	1043	1498
530	390	390	12,49	12,32	9,09	9,11	1192	1499
530	450	450	12,65	12,49	10,81	10,59	1349	1500
530	500	500	12,97	12,71	13,1	12,75	1498	1500

Terlihat dari Tabel I perbandingan diatas bahwa pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan *inverter* dan *autotrafo* tanpa beban sama-sama lebih lebih kecil arusnya pada saat tegangan motor lebih kecil dari sumber, apabila tegangan dinaikkan sampai pada nilai yang sama dengan sumber maka pengunaan arus listrik lebih besar karena perangkat pengendali juga sebagai beban. Pada *autotrafo* daerah pengaturan kecepatan lebih sempit dibandingkan dengan pengendalian dengan *inverter*.

C. Hasil Simulasi Menggunakan Pengendalian Inverter Berbeban 50 n.m

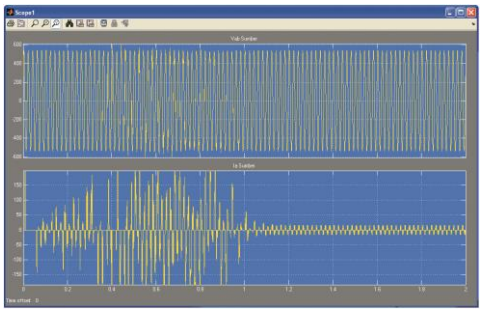
Pada Gambar 24 menunjukkan besar arus stator = 28,1 A, kecepatan rotor = 436 dan torsi dalam kondisi berbeban pada motor induksi tiga fasa dengan besar tegangan = 200 Volt.



Gambar 24.Gelombang I_a Stator, Kecepatan, Torsi, V_{ab} Stator *Inverter* Berbeban 50 n.m Terhadap Waktu (s)

Gambar 24 juga menunjukkan kecilnya frekuensi karena terlihat jarak gelombang atau lebar gelombang cukup lebar. Untuk pencapaian *steady state* kurang lebih sama dengan kondisi tanpa beban tapi arusnya semakin besar dan putaran rotor menurun akibat dari adanya beban.

Pada Gambar 25. diatas menunjukkan tegangan pada inputan *inverter* = 530 Volt dan arusnya = 12,6 A, besar arusnya pada inputan lebih kecil dari pada arus pada sisi stator karena pengaruh perubahan tegangan pada sisi stator motor.

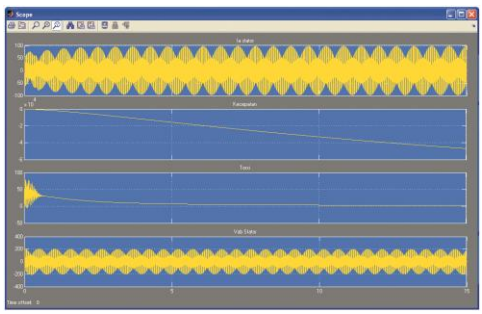


Gambar 25. Gelombang V_{ab} dan I_a pada Inputan *Inverter* Berbeban 50 n.m Terhadap Waktu (*s*)

Arusnya naik sebanding dengan peningkatan arus pada sisi stator yang di akibatkan oleh beban motor.

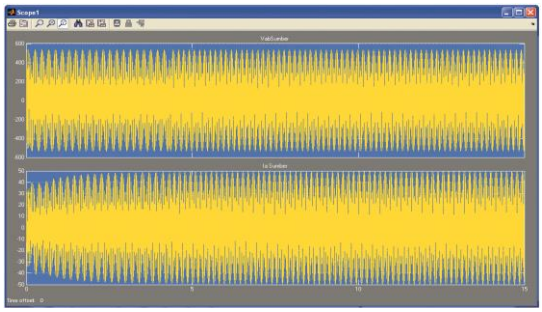
D. Hasil Simulasi Menggunakan Pengendalian Autotrafo Berbeban 50 n.m

Pada Gambar 26 menunjukkan besar arus stator = 95,5 A, rotor tidak berputar dan torsi dalam kondisi berbeban, pada motor induksi tiga fasa dengan besar tegangan = 200 Volt.



Gambar 26. Gelombang I_a Stator, Kecepatan, Torsi, V_{ab} Stator *Autotrafo* Berbeban 50 n.m Terhadap Waktu (*s*)

Gambar 26 juga menunjukkan lonjakan arus yang cukup tinggi karena rotor tidak dapat bergerak karena beban, kalau pada kondisi seperti ini dibiarkan cukup lama bisa menjadikan motor terbakar. Kondisi seperti ini dikarenakan pengaturan tegangan tidak di barengi dengan pengaturan frekuensi seperti pada pengendalian *inverter* jadi fluksi motornya tidak konstan. Dimana $\Phi=V/f$ meskipun dengan daya kecil motor tetap bisa berputar. Gambar 27 menunjukkan tegangan pada inputan *autotrafo* = 530 Volt dan arusnya = 48,9 A, arusnya juga naik cukup besar karena pada sisi stator juga naik karena motor tidak berputar.



Gambar 27. Gelombang V_{ab} dan I_a pada inputan *Autotrafo* Berbeban 50 n.m Terhadap Waktu (*s*)

Gambar 27 menunjukkan tegangan pada inputan *autotrafo* = 530 Volt dan arusnya = 48,9 A, arusnya juga naik cukup besar karena pada sisi stator juga naik karena motor tidak berputar.

Terlihat dari Tabel II perbandingan bahwa pengendalian motor induksi tiga fasa menggunakan *inverter* dan *autotrafo* cukup beda jauh saat berbeban. Kalau pada pengendalian menggunakan *inverter* arus naik saat pengaturan tegangan di naikkan.

TABEL II
PERBANDINGAN ANTARA PENGENDALIAN INVERTER DAN AUTOTRAFO BERBEBAN 50 N.M

Tegangan Sumber (Volt)	$V_{L-L\ stator}$ (Volt)		I stator (Ampere)		I inputan (Ampere)		Kecepatan (rpm)	
	Inverter	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*
530	200	200	28,1	95,5	12,6	48,9	436	-
530	263	263	28,1	56,5	15,9	35,2	597	713
530	295	295	28,6	48,1	18,1	32,5	778	985
530	353	353	28,7	39,8	21,2	30,8	932	1189
530	390	390	28,7	36,2	23,4	30,3	1084	1265
530	450	450	29,3	32,6	26,8	29,9	1235	1327
530	500	500	29,6	29,1	30,1	29,75	1385	1358

Pada pengendalian menggunakan *autotrafo* saat tegangan 200 Volt motor tidak berputar dan arus sangat tinggi, ketika tegangan di naikkan maka motor berputar dan arus akan berangsur-angsur turun sampai pada saat tegangan hampir sama dengan sumber, arusnya hampir sama dengan pengendalian *inverter* saat kondisi tegangan sama dengan sumber juga. Hal ini dikarenakan pengendalian menggunakan *autotrafo* tidak di ikuti dengan perubahan frekuensi yang mengakibatkan fluksi motor turun, pers. (11-12). Dari pers. (11-12) diatas hasil perhitungannya dapat dilihat pada Tabel III

TABEL III
PERHITUNGAN FLUKSI DAN I2 PADA INVERTER DAN AUTOTRAFO DENGAN BEBAN 50 N.M

No.	$V_{L-L\ stator}$ (Volt)		Frekuensi (Hz)		I_2 (Ampere)		Fluksi (Wb)	
	Inverter	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*	*Inverter*	*Autotrafo*
1	200	200	20	50	5	12,25	10	4
2	263	263	25	50	4,75	9,51	10,52	5,26
3	295	295	30	50	5,09	8,47	9,83	5,9
4	353	353	35	50	4,96	7,08	10,08	7,06
5	390	390	40	50	5,13	6,41	9,75	7,8
6	450	450	45	50	5	5,56	10	9
7	500	500	50	50	5	5	10	10

Terlihat dari hasil perhitungan fluksi dan I_2 pada *inverter* dan *autotrafo* yang mempengaruhi arus pada pengendalian menggunakan *autotrafo* saat tegangan kecil yang menjadikan arusnya besar ini di sebabkan oleh fluksi magnet yang semakin kecil, dan ini juga berpengaruh pada I_2 yang semakin besar. Ketika tegangan dinaikkan fluksi semakin naik yang ini mengakibatkan arus pada I_2 turun dan arus statornya juga ikut turun. Pada pengendalian menggunakan *inverter* karena fluksi di pertahankan konstan dengan merubah atau mengatur frekuensi dan tegangan ini yang menyebabkan kondisi arus tidak berubah banyak.

V. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Analisis Penghematan Energi

Perhitungan daya dan energi motor dengan pengendalian *Inverter* berbeban 50 n.m. mesin *Extruder* dalam sehari beroperasi selama 6 jam. Jadi energi listrik yang dibutuhkan selama beroperasi dapat dihitung sebagai berikut:

$$W = P \times t \tag{15}$$

dimana W adalah energi listrik (kWh); P adalah daya listrik (kW), dan t adalah waktu penggunaan (jam)

TABEL IV
PERHITUNGAN DAYA DAN ENERGI MOTOR DENGAN PENGENDALIAN INVERTER BERBEBAN 50 N.M

No.	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Cosφ	Daya (Watt)	Energi Listrik (KWH)	Kecepatan (rpm)
1	530	12,6	0,86	9947,31	59,68	436
2	530	15,9	0,86	12.552,55	75,31	597
3	530	18,1	0,86	14.289,38	85,73	778
4	530	21,2	0,86	16.736,74	100,42	932
5	530	23,4	0,86	18.473,57	110,84	1084
6	530	26,8	0,86	21.157,76	126,94	1235
7	530	30,1	0,86	23.763,01	142,58	1385

Kebutuhan kecepatan motor untuk mengerakkan mesin *Extruder* adalah kisaran 500-600 rpm. Jadi energi listrik yang dibutuhkan dalam sehari untuk mengoperasikan mesin *Extruder* adalah 75,31 KWH.

B. Perhitungan Daya dan Energi Listrik Motor Dengan Pengendalian Autotrafo Berbeban 50 n.m

Kebutuhan kecepatan motor untuk mengerakkan mesin *Extruder* adalah kisaran 500-600 rpm. Dalam pengaturan menggunakan *autotrafo* kecepatan yang diinginkan tidak tercapai, jadi diasumsikan pengaturan kecepatan motor tidak digunakan dan pengaturan kecepatanya menggunakan *gear box* dan kecepatan motor dalam kondisi normal.

TABEL V
PERHITUNGAN DAYA DAN ENERGI LISTRIK MOTOR DENGAN PENGENDALIAN AUTOTRAFO BERBEBAN 50 N.M

No.	Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)	Cosφ	Daya (Watt)	Energi Listrik (KWH)	Kecepatan (rpm)
1	530	48,9	0,86	38.605,02	231,63	-
2	530	35,2	0,86	27.789,3	166,73	713
3	530	32,5	0,86	25.657,73	153,94	985
4	530	30,8	0,86	24.315,64	145,89	1189
5	530	30,3	0,86	23.920,9	143,52	1265
6	530	29,9	0,86	23.605,12	141,63	1327
7	530	29,75	0,86	23.486,7	140,92	1358

Dengan demikian, energi listrik yang dibutuhkan dalam sehari untuk mengoperasikan mesin *Extruder* adalah 140,92 KWH. Pengehematan energi pengoperasian mesin *Extruder* dalam sehari sebesar 140,92 - 75,31 = 65,61 kWh.

V. KESIMPULAN

Dari simulasi pengendalian kecepatan motor dengan *inverter* dengan tujuan penghematan energi, dapat dibuat beberapa kesimpulan, yaitu:

1) Motor induksi bisa melakukan penghematan energi ketika kecepatan motor dibawah kecepatan nominal.
2) Penghematan energi dalam pengoperasian mesin *Extruder* dalam sehari mencapai 65,61 kWh.
3) Pada kondisi berbeban, motor masih bisa berputar meskipun tegangan dan frekuensinya diturunkan.
4) Wilayah pengaturan kecepatan lebih lebar.

5) Pada pengendalian *autotrafo* berbeban saat tegangan diatur terlalu kecil motor tidak bisa berputar.

VI. DAFTAR PUSTAKA

[1] Arthur E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Jr., and Stephen D. Umans, "*Mesin-Mesin Listrik*" edisi keempat Penerbit Erlangga 1992

[2] Zuhal. "Dasar Teknik Tenaga Listrik dan Elektronika Daya" Penerbit Gramedia Pustaka Utama 1995.

[3] Mohan, N., T.M. Undeland, and S.D. Sudhoff, "Power Electronics: Converters, Applications", and Design, Jhon Wiley & Sons, Inc., New York, 1995, Section 8.4.1

[4] Pillai S.K, "A First Course on Electrical Drives" Wiley Eastern Limited 1983

[5] The Math Works Inc, "SimPowerSystems Modeling Simulation Implementation" User's GuideVersion 3 TransEnergie Technologies Inc 2003.

[6] The Math Works Inc, "*SimPowerSystems Reference 5'*'Hydro-Québec and TheMathWorks, Inc. 2009