

BAB III

METODE PENELITIAN

Berikut ini adalah *flow chart* atau diagram alir dari penelitian dan simulasi yang akan diterapkan.



Gambar 3.1 *Flow Chart* Metode Analisa Start Motor Induksi Tiga Fasa

3.1 Studi Literatur

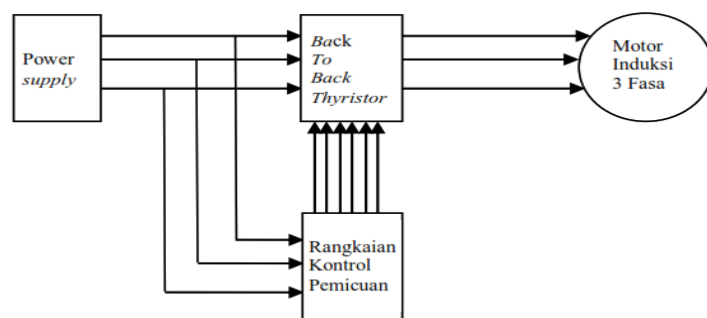
Hal yang dilakukan pertama kali yaitu mempelajari buku serta referensi yang berhubungan dengan motor induksi tiga fasa. Hal ini dilakukan untuk menambah pemahaman mengenai permasalahan yang dihadapi.

Dalam laporan tugas akhir ini penulis mempelajari beberapa referensi yang membahas tentang metode-metode *starting* motor induksi tiga fasa. Beberapa metode *starting* motor induksi tiga fasa diantaranya: DOL, *star-delta*, *auto transformer*, *Soft starter* (pengatur tegangan), dan mempelajari metode *soft starter* dengan kontrol *thyristor*

3.2 Pemodelan-Pemodelan

3.2.1 Pemodelan Sistem

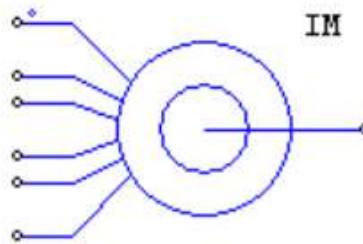
Pemodelan sistem yang akan dilakukan dalam penelitian ini, didalamnya terdapat komponen yang kompleks, pemodelan ini bertujuan agar pembaca lebih mudah untuk membaca sistem secara keseluruhan.



Gambar 3.2 Pemodelan Sistem

3.2.2 Pemodelan Motor

Motor induksi yang digunakan dalam pemodelan ini menggunakan jenis motor induksi tiga fasa rotor sangkar dengan kumparan stator dihubungkan delta. Spesifikasi motor sesuai dengan salah satu jurnal internasional. Berikut adalah pemodelan motor induksi:



Gambar 3.3 Pemodelan Motor Induksi

Spesifikasi motor induksi dapat dilihat pada Tabel 3.1 dibawah ini:

Nominal Power	1500 W
Tegangan line	380 V
Kecepatan rata-rata (nr)	1454 rpm
Resitansi stator (R_s)	4.05 Ω
Induktansi stator (L_s)	1.397 mH
Resistansi rotor (R_r)	2.6 Ω
Induktasi rotor (L_r)	1.397 mH
Induktansi magnetisasi (L_m)	53.868 mH
Jumlah kutub	4
Momen inersia	0.01 kgm ²

Berdasarkan data spesifikasi motor induksi pada Tabel 3.1 maka dapat dihitung nilai torsi elektromagnetik motor saat *start* dengan menggunakan persamaan (2.14).

Berikut perhitungan torsi elektromagnetik saat start:

- Menghitung nilai reaktansi dari motor induksi:

$$X_S = 2\pi f L_S = 2\pi \times 50 \times 0.01397 = 4.388\Omega$$

$$X_R = 2\pi f L_R = 2\pi \times 50 \times 0.01397 = 4.388\Omega$$

$$X_M = 2\pi f L_M = 2\pi \times 50 \times 0.53868 = 169.23$$

- Menghitung nilai kecepatan sinkron dalam rad/s:

$$\Omega_{\text{syn}} = \frac{2\pi n_s}{60} = \frac{2\pi \times 1500}{60} = 157.08 \text{ rad/s}$$

- Menghitung nilai tegangan Thevenin berdasarkan persamaan (2.8):

$$V_{\text{TH}} = \frac{X_M}{\sqrt{R_S^2 + (X_S + X_M)^2}} \times V_0$$

$$= \frac{169.23}{\sqrt{4.05^2 + (4.388 + 169.23)^2}} \times \frac{380}{\sqrt{3}}$$

$$= 0.974 \times 219.4$$

$$V_{\text{TH}} = 213.695 \text{ V}$$

- Menghitung nilai impedansi resistansi Thevenin dan reaktansi Thevenin berdasarkan persamaan (2.11 & 2.12):

$$R_{TH} = R_S \left(\frac{X_M}{X_S + X_M} \right)^2$$

$$= 4.05 \times \left(\frac{169.23}{4.388 + 169.23} \right)^2$$

$$= 3.842 \Omega$$

- $X_{TH} = X_S = 4.388 \Omega$
- Menghitung nilai torsi elektromagnetik motor saat start berdasarkan data spesifikasi motor induksi pada tabel 3.1:

$$\tau_{Start} = \frac{3V_{TH}^2 \times RR}{\omega_{Syn}[(R_{TH} + RR)^2 + (X_{TH} + X_R)^2]}$$

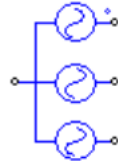
$$\tau_{Start} = \frac{3 \times 213.695^2 \times 2.6}{157.08[(3.842 + 2.6)^2 + (4.388 + 4.388)^2]}$$

$$\tau_{Start} = 19.132 \text{ Nm}$$

3.2.3 Pemodelan Rangkaian *Power Supply*

Pemodelan rangkaian *power supply* menggunakan menggunakan *software* PSIM. Tegangan input yang diberikan pada motor induksi ini menyesuaikan dengan rating tegangan dari motor induksi yang digunakan dalam pemodelan sistem. Rating tegangan motor induksi yang digunakan adalah 380 Volt. Tegangan input ini merupakan tegangan AC tiga fasa yang seimbang dengan beda fasa 120° antar

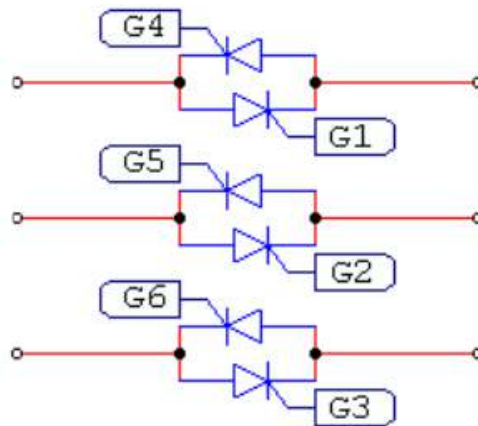
fasanya dan frekuensi 50 Hz. Berikut adalah pemodelan supply tegangan input:



Gambar 3.4 Pemodelan Rangkain *Power Supply*

3.2.4 Pemodelan Rangkaian *Thyristor*

Pemodelan rangkaian *thyristor* merupakan konfigurasi dua buah thyristor yang dipasang antiparalel satu sama lain dan terpasang seri dengan sumber listrik tiga fasa dan kumparan stator. Konfigurasi ini memungkinkan untuk mengatur tegangan yang akan masuk ke motor dengan cara mengatur sudut penyalaan dari tegangan masukan. Tujuan pemasangan antiparalel thyristor ini untuk mengatur tegangan AC saat siklus positif dan siklus negatif. Berikut adalah pemodelan *back to back thyristor*.



Gambar 3.5 Pemodelan *Rangkaian Thyristor*

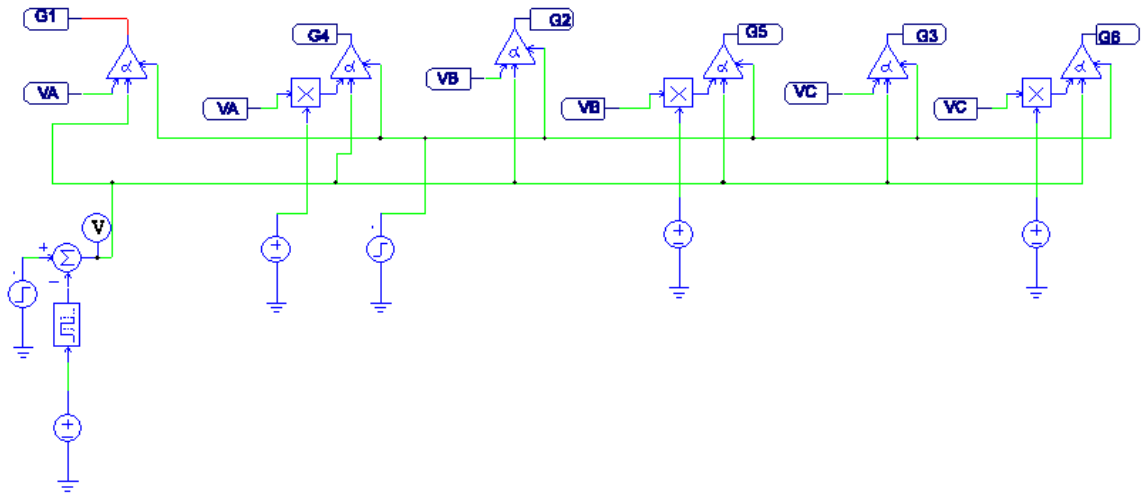
Keterangan G1, G2, G3, G4, G5, dan G6 merupakan gerbang masing-masing *thyristor* yang akan dihubungkan ke rangkaian kontrol pemecuan. *Thyristor* tersebut akan mengatur siklus positif dan negatif dari tegangan AC pada masing-masing fasa.

3.2.5 Pemodelan Rangkaian Kontrol Pemecuan

Rangkaian kontrol pemecuan adalah rangkaian kontrol yang bertugas mengatur dan menghasilkan sinyal pemecuan yang kemudian dialirkan ke gerbang *thyristor*. Sinyal pemecuan ini berupa sudut penyalaan atau α bagi *thyristor*. Sehingga dari rangkaian ini dapat diatur di sudut berapa *thyristor* dapat mengalirkan arus ke motor. Misalnya dipilih $\alpha = 45^\circ$, maka *thyristor* akan mulai mensuplai tegangan ke motor saat tegangan berada pada sudut 45° . Sehingga arus akan mengalir ke motor pada kondisi tersebut. Rangkaian kontrol

pemicuan ini berperan penting dalam metode soft-starter dan juga metode starting yang akan digunakan pada sistem ini. Berikut akan dijelaskan peran dari rangkaian kontrol pemicuan pada kedua metode starting tersebut.

Pada starting motor induksi metode soft starter, rangkaian kontrol pemicuan hanya berperan untuk mengatur tegangan yang akan disuplai ke motor. Besar tegangan yang diinginkan dapat diperoleh dengan cara mengatur sudut penyalan *thyristor*. Semakin besar sudut maka penyalannya maka semakin kecil tegangan yang disuplai ke motor dan sebaliknya. Namun besar tegangan maksimal yang bisa disuplai ke motor sama dengan besar tegangan sumber yaitu pada saat $\alpha = 0^\circ$. Pada kondisi ini sama saja motor diberi tegangan penuh atau dengan kata lain motor di- start dengan metode Direct on line (DOL). Metode soft-starter ini hanya menghasilkan tegangan yang lebih kecil dari tegangan sumber, karena hubungan dari tegangan sebanding dengan arus. Oleh sebab itu metode ini juga disebut dengan metode pengurangan tegangan sumber. Berikut adalah gambar pemodelan rangkaian kontrol pemicuan *soft starter*.



Gambar 3.6 Pemodelan Rangkaian Kontrol Pemicuan

Pemodelan rangkaian kontrol pemicuan diatas menunjukkan bahwa yang berperan mengasilkan sinyal masukan ke *gate thyristor* adalah *alpha controller*. *Alpha controller* ini memiliki tiga masukan antara lain: sinyal keluaran dari *comparator*, komponen penghasil sudut penyalaan dan komponen penghasil sinyal bernilai 1. Adapun peran dari ketiga masukan sebagai berikut:

3.2.5.1 Comparator

Comparator ini mendapat dua masukan yaitu masukan dari tegangan sumber pada terminal *noninverting*, *comparator* yang bertanda positif dan terminal *inverting comparator* yang bertanda negatif yang dihubungkan dengan *ground*. Keluaran dari *comparator* sendiri yaitu keluaran *comparator* bernilai “1” ketika

masukan *noninverting* lebih tinggi dari masukan *inverting*. Saat masukan *noninverting* lebih rendah dari masukan *inverting* maka keuaran *comparator* bernilai “0”. Jadi keluaran dari *comparator* ini bernilai “1” dan “0”. Dapat dikatakan *comparator* ini berfungsi sebagai *zero crossing detector*. Keluaran dari *comparator* ini nantinya menjadi masukan pada terminal sebelah kiri bawah *alpha controller*.

3.2.5.2 Sudut penyalan

Sudut penyalan ini merupakan komponen yang bertujuan menghasilkan besar sudut penyalan sesuai yang diinginkan. Komponen ini pada simulink berupa sumber tegangan DC, dimana jika kita memberi nilai tegangan DC sebesar 90 Volt maka *alpha controller* akan membaca data tersebut sebesar 90°. Keluaran dari komponen sudut penyalan ini nantinya menjadi masukan pada terminal sebelah tengah bawah *alpha controller*.

3.2.5.3 Penghasil sinyal bernilai 1

Pada simulink penghasil sinyal bernilai “1” ini berupa komponen *not gate* yang dihubungkan dengan ground. Keluaran dari komponen ini nantinya menjadi masukan pada terminal sebelah samping kanan *alpha controller* dimana terminal ini berfungsi sebagai pengatur *on-off* dari *alpha controller* tersebut. Prinsip kerja dari *alpha controller* ini yaitu saat terminal sebelah

samping kanan diberi masukan sinyal logika “1” maka komponen ini akan on atau dalam kondisi aktif. Kemudian masukan dari keluaran *comparator* merupakan sinyal sinkronisasi yang merupakan sinyal referensi bagi *alpha controller*. Setelah itu masukan dari besar sudut penyalan yang diinginkan akan men-delay sinyal dari *comparator* tadi. Sehingga *output* dari *alpha controller* ini merupakan sinyal keluaran dari *comparator* yang telah di-*delay* sebesar sudut penyalan yang diinginkan. Besar lebar pulsa dari sinyal keluaran *alpha controller* ini dapat diatur sesuai keinginan.

3.2.6 Pemodelan Rangkaian Kontrol Pemicuan Untuk Metode Kontrol Tegangan Dan Frekuensi

Metode kontrol tegangan dan frekuensi ini merupakan metode starting motor induksi yang digunakan pada sistem. Metode ini diharapkan mampu mengurangi arus saat start dan menghasilkan torsi elektromagnetik yang besar sehingga motor dapat di-start ketika berbeban. Pengaturan tegangan yang digunakan pada metode ini sama dengan yang digunakan metode soft-starter. hanya saja pada metode ini ditambahkan pengaturan frekuensi dari tegangan sumber.

Pengaturan frekuensi ini menggunakan metode DFC (*Discrete Frequency Control*). Dalam metode DFC, frekuensi variabel diskrit

diperoleh dengan memicu *thyristor* untuk menghilangkan atau mengikutsertakan sebagian setengah siklus tegangan sumber dan frekuensi variabel diskrit merupakan *subharmonic* dari frekuensi tegangan sumber. Sudut pemucuan pada setiap periode tegangan sumber dirancang berdasarkan pada prinsip yang setara dengan *sinusoidal modulation*. Berdasarkan analisis prinsip DFC di atas, frekuensi sub-multipel dihasilkan dari frekuensi sumber yang berarti frekuensi tegangan sumber atau suplai, berhubungan dengan frekuensi diskrit yang dihasilkan.

$$\omega_{spl} = \omega_{dis} \times r \quad (3.1)$$

Dimana r adalah bilangan interger

Persamaan tegangan tiap fasa dari tegangan suplai yaitu:

$$U_A = U \sin (\omega_{spl} \times t) \quad (3.2)$$

$$U_B = U \sin \left(\omega_{spl} \times t - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (3.3)$$

$$U_C = U \sin \left(\omega_{spl} \times t - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (3.4)$$

$$\phi_i = \omega_i \times t | I = spl, dis \quad (3.5)$$

Jadi persamaan sudut fasanya (mengacu pada fasa A dari sistem yang dihasilkan)

$$[\phi_A, \phi_B, \phi_C]_{dis} = \left[0, \frac{2m\pi + \frac{2\pi}{3}}{r}, \frac{2n\pi + \frac{4\pi}{3}}{r} \right] \quad (3.6)$$

Dimana $m = 0, 1, 2, \dots, r-1$ dan $n = 0, 1, 2, \dots, r-1$

Jadi akan ada r^2 kombinasi dari inisial sudut fasa dalam sistem tiga fasa DFC, yang beberapa diantaranya merupakan sistem yang seimbang dan beberapa merupakan sistem yang tidak seimbang. (dimana $\frac{r-1}{3}$ merupakan bilangan interger atau bisa juga tidak merupakan bilangan interger).

Untuk kesederhanaan dan kepraktisan, maka akan dipilih sesuai dengan sudut pandang yang telah jelas terbukti. Antara sistem dengan *submultiple* r yang serupa, semakin dekat sistem dengan *positive balanced sequence* maka lebih banyak torsi yang dihasilkan.

Tentukan bahwa:

$$[\emptyset_A, \emptyset_B, \emptyset_C]_{\text{dis}} = \left[0, \frac{2m\pi + \frac{2\pi}{3}}{r}, \frac{2n\pi + \frac{4\pi}{3}}{r} \right] = \left[0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3} \right] \quad (3.7)$$

Kemudian,

$$[m, n] = \left[\frac{r-1}{3}, \frac{2(r-1)}{3} \right] \quad (3.8)$$

Saat $r = 3k + 1$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), persamaan (3.8) adalah valid atau berlaku dan inisial kombinasi sudut fasa yang optimal adalah

$$[\emptyset_A, \emptyset_B, \emptyset_C]_{\text{dis}} = \left[0, \frac{2\pi}{3}, \frac{4\pi}{3} \right] \quad (3.9)$$

Saat $r \neq 3k + 1$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), persamaan (3.8) adalah tidak valid atau tidak berlaku dan tidak ada positive balanced sequence yang terjadi pada kondisi ini.

Supaya menghasilkan torsi positif yang tinggi dan stabil maka sistem yang seimbang akan menjadi pilihan yang tepat. Oleh sebab itu *submultiple* r harus memenuhi persamaan $r = 3k + 1$ ($k = 0, 1, 2, \dots$), misalnya, 1, 4, 7, 10. Jadi pada sistem ini akan dipilih frekuensi diskrit dengan kombinasi sudut fasa yang dapat menghasilkan *balanced system*.

Frekuensi diskrit tersebut antara lain 5 Hz, 7.143 Hz dan 12.5 Hz. Frekuensi diskrit yang akan digunakan dalam penelitian ini adalah frekuensi 5 Hz dan frekuensi 12.5 Hz. Dengan submultiple r masing-masing 10 dan 4. Kombinasi sudut fasa dari frekuensi diskrit di atas ditunjukkan pada tabel dibawah ini.

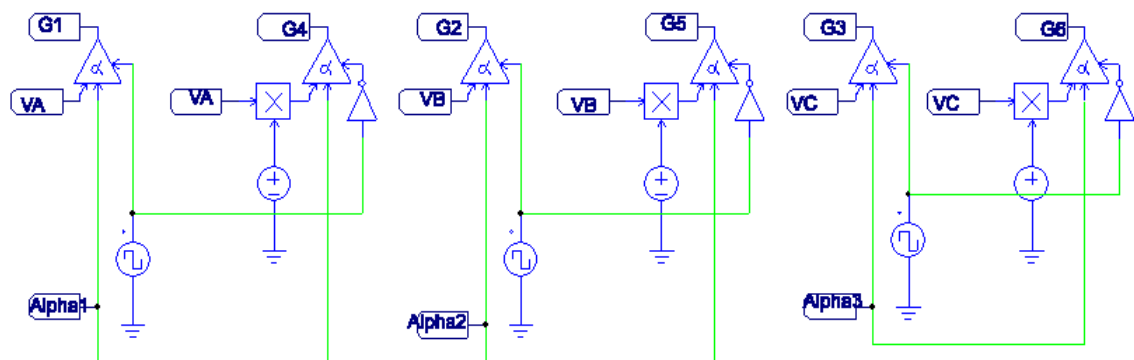
Tabel 3.2 Kombinasi Sudut Fasa untuk Frekuensi diskrit 5Hz ($r=10$)

m,n	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0	0°	12°	24°
1	0°	48°	60°
2	0°	84°	96°
3	0°	120°	132°
4	0°	156°	168°
5	0°	192°	204°
6	0°	228°	240°
7	0°	264°	276°
8	0°	300°	312°
9	0°	336°	348°

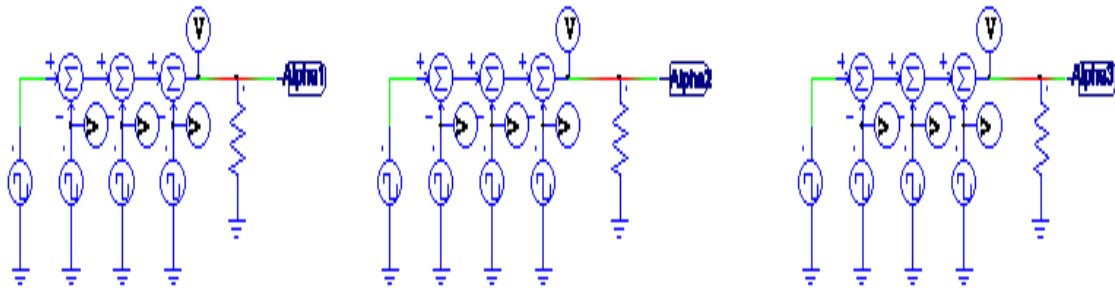
Tabel 3.3 Kombinasi Sudut Fasa untuk Frekuensi diskrit 12.5Hz ($r=4$)

m,n	Fasa A	Fasa B	Fasa C
0	0°	30°	60°
1	0°	120°	150°
2	0°	210°	240°
3	0°	300°	330°

Rangkaian kontrol pemucuan untuk metode ini secara umum mirip dengan rangkaian pemucuan untuk metode *soft-starter* yang membedakan hanya pada masukan sebelah samping kanan dari *alpha controller*. Dimana masukan dariterminal ini bervariasi sesuai dengan frekuensi diskrit yang diinginkan. Berikut adalah gambar pemodelan rangkaian kontrol pemucuan untuk metode kontrol tegangan dan frekuensi.



(a)



(b)

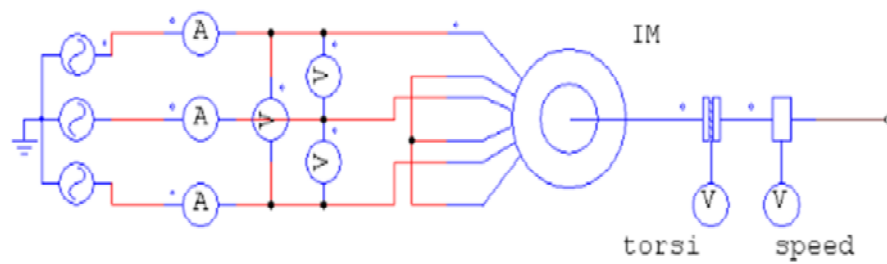
Gambar 3.7 (a) Pemodelan Rangkaian Kontrol Pemicuan *Thyristor*

(b) Pemodelan Rangkaian Penghasil Sudut Fasa

Dengan komponen ini memungkinkan untuk mengaktifkan dan menonaktifkan *alpha controller* sesuai frekuensi yang diinginkan. Selain itu dimungkinkan juga untuk mengatur *phase delay* dari masing-masing fasa.

3.2.7 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode DOL

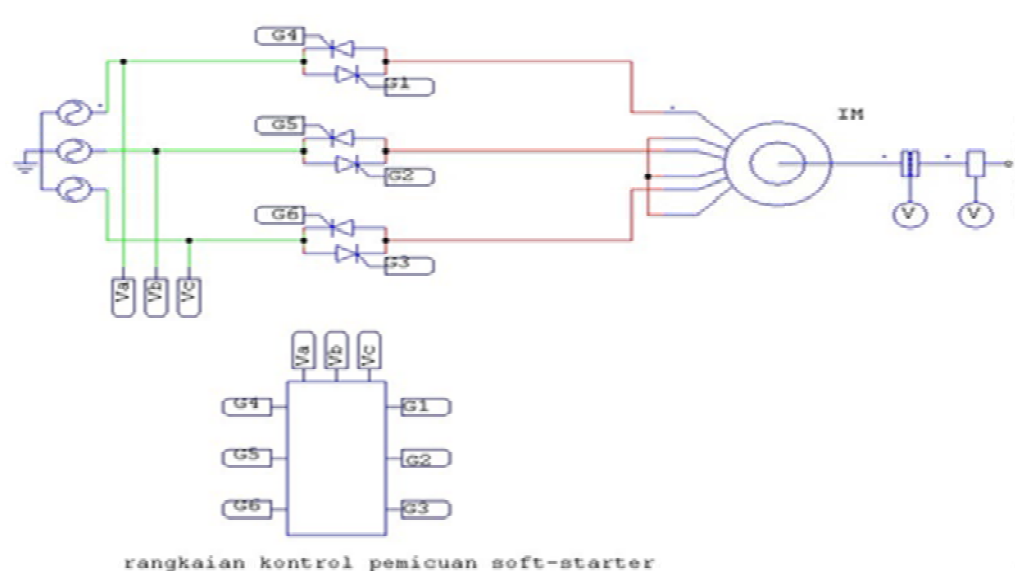
Pemodelan *starting* metode DOL ini bukanlah sitem utama dari penelitian ini. Namun hasil simulasi dari metode ini nantinya akan menjadi pembanding dengan hasil simulasi sistem utama. Berikut adalah pemodelan *starting* metode DOL.



Gambar 3.8 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode DOL

3.2.8 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode *Soft-Starter* (Pengatur Tegangan)

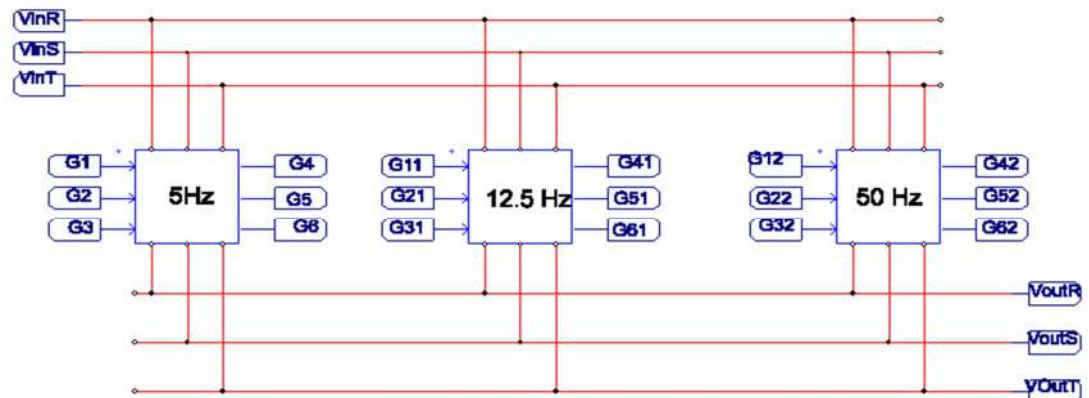
Sama halnya dengan metode DOL, metode *soft-starter* ini hanya sebagai pembanding sistem utama. Berikut adalah pemodelan rangkaian *starting* metode *soft-starter*



Gambar 3.9 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode *Soft-Starter*

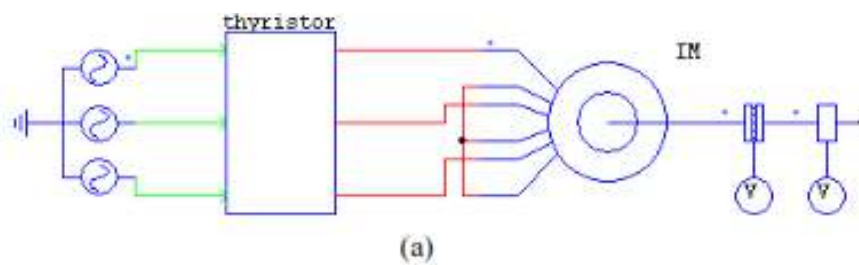
(Pengatur Tegangan)

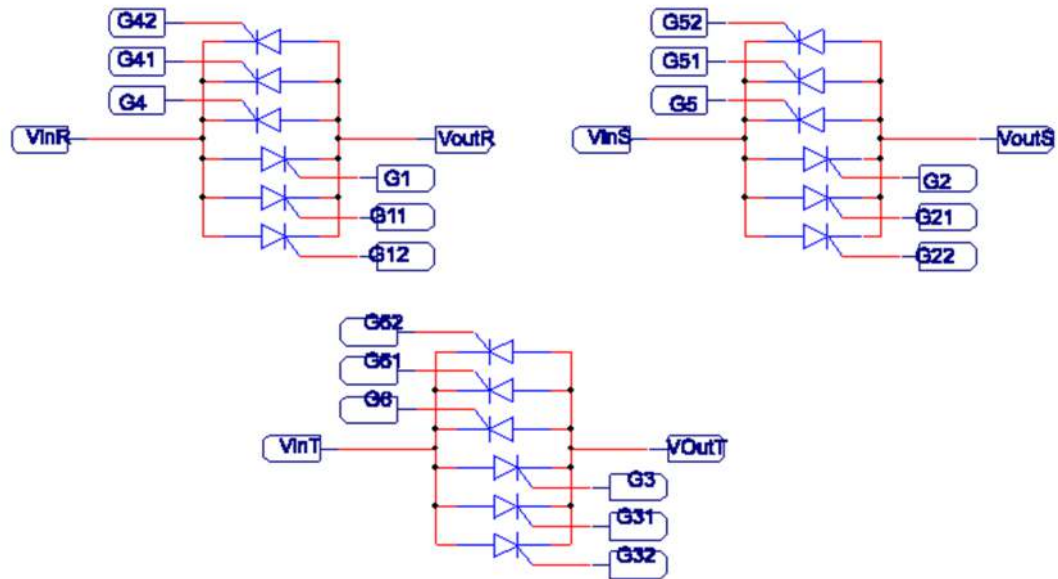
3.2.9 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode *Soft-Starting* dengan Kontrol Tegangan dan Frekuensi



Gambar 3.10 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode *Soft-Starting* dengan Kontrol Tegangan dan Frekuensi

3.2.10 Pemodelan Rangkaian *Starting* Metode Kontrol Tegangan dan Frekuensi dengan 4 Tahapan Frekuensi





(b)

Gambar 3.11 (a) Pemodelan Rangkaian Secara Sistem

(b) Pemodelan Rangkaian kontrol *Thyristor*

3.2.11 Pemodelan Berat Beban Motor Induksi Tiga Fasa

Pemodelan berat beban yang akan digunakan sebagai data analisa dalam penelitian ini ada dua, yaitu: beban penuh dan beban setengah penuh. Beban penuh adalah beban yang besarnya sesuai dengan rating kecepatan mekanik beban dan kapasitas *rating* daya dari motor induksi yang digunakan. Setengah beban penuh adalah beban yang besarnya setengah dari nilai beban penuh.

Adapun nilai dari masing-masing beban di atas dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$T_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m}$$

1) Beban Penuh

P_{out} merupakan daya output, dari pemodelan motor induksi yang digunakan untuk penelitian ini memiliki daya output sebesar 1500 Watt. untuk ω_m merupakan kecepatan mekanik dalam rad/s.

berdasarkan data, $n_r = 1454$ rpm, maka:

$$\omega_m = \frac{2\pi n_r}{60} = \frac{2\pi \cdot 1454}{60} = 152.26 \text{ rad/s}$$

$$T_{\text{load}} = \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m} = \frac{1500}{152.26} = 9.85 \text{ Nm}$$

2) Beban Setengah Penuh

Dari perhitungan beban penuh diatas, perhitungannya

sebagai berikut: $\frac{1}{2} T_{\text{load}} = \frac{1}{2} \times \frac{P_{\text{out}}}{\omega_m} = \frac{1}{2} \times 9.85 = 4.925 \text{ Nm}$

3.3 Pengumpulan Data

Metode ini dilakukan setelah, pemodelan-pemodelan dari beberapa metode *starting*, dan selanjutnya akan disimulasikan. Berikut ini beberapa data yang akan diambil dari simulasi tersebut, diantaranya:

1. *Starting* motor induksi tiga fasa dengan metode DOL (*Direct on line*) dihubungkan dengan beban setengah penuh dan beban penuh.
2. *Starting* motor induksi tiga fasa dengan metode *soft-starter* pengatur tegangan dihubungkan dengan setengah beban penuh dan beban penuh.
3. *Starting* motor induksi tiga fasa dengan metode pengaturan tegangan dan frekuensi menggunakan 3 tahapan frekuensi dihubungkan dengan beban setengah penuh dan beban penuh.

data-data di atas disimulasikan menggunakan *software* PSIM, dari simulasi tersebut akan terlihat beberapa parameter, diantaranya arus saat *start*, arus saat *steady*, kurva torsi elektromagnetik, dll. Dari pengumpulan beberapa data dari hasil simulasi pemodelan rangkaian yang menggunakan beberapa metode *starting* motor induksi tiga fasa. Maka akan berlanjut ke metode selanjutnya, yaitu analisa data yang diperoleh dan kesimpulan.

3.4 Analisa Data dan Kesimpulan

3.4.1 Analisa Data

Analisa data menggunakan teknik deskriptif, yang diterapkan untuk menganalisa perbaikan torsi elektromaktenik pada *starting* motor induksi tiga fasa dengan kontrol thyristor untuk pengaturan tegangan dan frekuensi. Berikut ini langkah-langkah untuk menganalisa data:

3.4.1.1 Pengumpulan Data Hasil Simulasi

Mengumpulkan data-data teknik dari hasil simulasi beberapa metode *starting* yang sudah ditentukan sebelumnya. Data-data yang dimaksud diantaranya adalah nilai dari arus saat *start*, arus saat *steady*, kurva torsi elektromagnetik, dll.

3.4.1.2 Mengolah dan Menyajikan Hasil Simulasi

Mengolah data yang didapatkan dari hasil simulasi, agar sajian data dapat diinterpretasikan dan dianalisa lebih menarik dan mudah dipahami.

3.4.1.3 Membandingkan Data dan Menginterpretasikan

Penelitian ini terdapat beberapa metode *starting*, diantaranya: *starting* DOL, *soft starting* (pengaturan tegangan), dan *soft starter* (*thyristor*).

Hasil yang ditampilkan oleh software PSIM berupa grafik, kurva dan tabel. Maka Analisa akan dilakukan dengan

deskriptif atau menjelaskan perbedaan dari masing-masing metode *starting* motor induksi tiga fasa. Maka dalam analisa ini akan dilakukan perbandingan antara beberapa metode *starting* motor tersebut.

3.5 Kesimpulan

Selanjutnya akan dilakukan kesimpulan dari data data yang diperoleh dan telah di Analisa, apakah data tersebut sudah relevan atau belum. Jika sudah relevan maka penelitian yang dianggap *finish* atau sebaliknya jika belum relevan maka, dilakukan perbaikan dan akan kembali ke tahap pemodelan rangkaian kembali. Proses tersebut akan berulang hingga mendapatkan hasil yang relevan.