

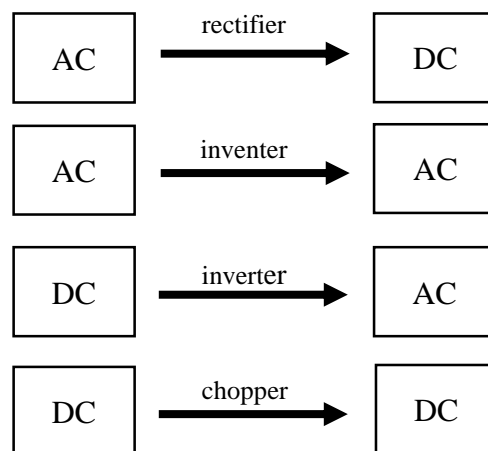
BAB II

LANDASAN TEORI

Bab landasan teori menjelaskan teori-teori dan beberapa referensi yang menjadi dasar untuk dapat membuat pemodelan AFE menggunakan pengendalian MPC. Bab ini terdiri dari beberapa penjelasan tentang konverter daya (*Power Converter*), konverter *Active Front End* (AFE), metode pengendalian *model predictive control* (MPC), jenis-jenis beban listrik, harmonisa, dan lingkungan MATLAB/Simulink. Selain itu, dijelaskan juga beberapa penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang memiliki keterkaitan dengan penelitian ini.

2.1 Konverter Daya (*Power Converter*)

Konverter daya atau *Power Converter* berperan penting dalam bidang pemrosesan daya dari skala kecil hingga besar, seperti pembangkitan dan transmisi. Tujuan utama dari konverter daya adalah untuk mendapatkan nilai pengondisian daya yang sesuai dengan nilai yang diinginkan. Ada beberapa jenis dari pengkonversian daya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.1.



Gambar 2.1 Jenis-Jenis Pengonversian Daya

Konverter AC-DC atau disebut *rectifier* (penyearah), mengonversi arus AC menjadi DC. Konverter DC-AC (*inverter*), beroperasi kebalikan dari *rectifier*, yaitu mengonversi arus DC menjadi AC dengan frekuensi dan magnitud yang diinginkan. Konverter DC-DC (*chopper*) mengonversi arus konstan/variabel DC pada level tegangan yang berbeda. Konverter AC-AC (*inverter*) mengonversi arus AC menjadi suplai arus AC dengan nilai frekuensi dan magnitud yang diinginkan. (Siwakoti, Forouzesha and Ha Pham, 2018).

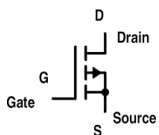
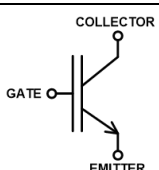
2.2 Active Front End Converter (AFE)

Konverter AC-DC (*rectifier*) merupakan tahap konversi pertama pada sebagian besar sistem elektronika daya. Emisi harmonik (harmonisa) yang dihasilkan berpengaruh terhadap kualitas jaringan listrik. Salah satu konverter daya adalah *active front end converter* atau disebut konverter AFE (Davari, Zare and Abdelhakim, 2018).

Active Front End (AFE) sebagai *rectifier* memiliki keunggulan dalam kemampuan meregenerasi daya dan menghasilkan nilai harmonisa rendah (Wei, Patel and Murthy, 2014). Komponen utama penyusun AFE merupakan semikonduktor aktif dan *controllable switching* (pensakelarnya dapat dikendalikan), contohnya adalah *Insulated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) (Yazdani and Iravani, 2010). Pemilihan IGBT sebagai komponen penyusun utama AFE karena IGBT dapat mengendalikan tegangan DC, arus input dikendalikan agar tetap pada bentuk gelombang sinusoidal (harmonisa tereduksi), teknik pensakelaran berfrekuensi tinggi, bekerja dengan faktor daya sangat tinggi, dan dapat bersifat regeneratif (*bidirectional powerflow*) (Wilamowski and Irwin, 2016).

Perbandingan kinerja dari MOSFET, dan IGBT yang dapat digunakan sebagai komponen penyusun konverter *active front end* (AFE) dapat dilihat pada Tabel 2.1 berikut.

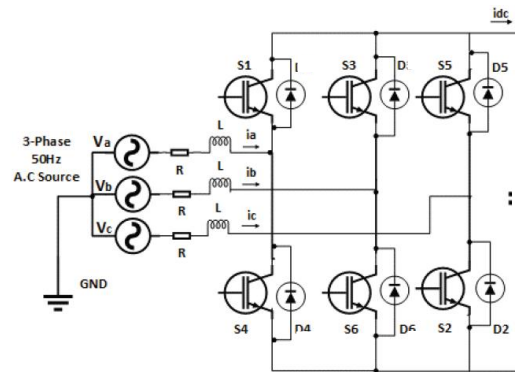
Tabel 2. Perbandingan MOSFET dan IGBT

Parameter	MOSFET	IGBT
Frekuensi Operasi	100 kHz	10 kHz
Tegangan Drop	4-5 volt	3 volt
Rating Maksimum	600 V/ 200 A	1500 V/ 400 A
variabel Pengendalian	Tegangan	Tegangan
Pengaplikasian	Kendali AC motor, SMPS	SMPS, Driver BLDC, Kendali AC motor, UPS
Simbol		

IGBT dan MOSFET adalah perangkat semikonduktor yang dikendalikan tegangan digunakan untuk memperkuat sinyal lemah. IGBT menggabungkan kemampuan resistansi rendah dari transistor bipolar dengan karakteristik penggerak tegangan MOSFET. MOSFET adalah perangkat semikonduktor empat terminal, sedangkan IGBT memiliki tiga terminal yang merupakan persilangan antara transistor bipolar dan MOSFET yang membuatnya sangat toleran terhadap pelepasan dan beban elektrostatik.

Keuntungan utama menggunakan IGBT dibandingkan jenis perangkat transistor lainnya adalah resistansi *ON* yang rendah, mudah digunakan, dan kecepatan peralihan *switch* yang relatif cepat menjadikannya pilihan yang baik apabila diaplikasikan pada sistem beregangan sedang hingga tinggi.

Diagram rangkaian dari konverter *active front end* (AFE) tiga fasa ditunjukkan pada Gambar 2.2 berikut.



Gambar 2.2 Diagram Rangkaian AFE

Suplai tegangan sumber AFE diasumsikan seimbang agar mempermudah perhitungan. Resistansi **R**, dan induktor **L**, merupakan filter pasif. **Va**, **Vb**, and **Vc** adalah tegangan per fasa. Sedangkan, **ia**, **ib** dan **ic** adalah arus per fasa.

Model matematika dari rangkaian AFE dapat dijelaskan sebagai berikut :

1. Tegangan sumber

$$V_a = V_m \sin \theta \quad (2.1)$$

$$V_b = V_m \sin \left(\theta - \frac{2\pi}{3} \right) \quad (2.2)$$

$$V_c = V_m \sin \left(\theta - \frac{4\pi}{3} \right) \quad (2.3)$$

2. Perhitungan tegangan sumber melewati resistansi R dan induktor L

$$V_a = L \frac{di_a}{dt} + Ri_a + V_{ar} \quad (2.4)$$

$$V_b = L \frac{di_b}{dt} + Ri_b + V_{br} \quad (2.5)$$

$$V_c = L \frac{di_c}{dt} + Ri_c + V_{cr} \quad (2.6)$$

3. Tegangan input pada AFE

$$V_{ar} = \left[S_a - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] V_{dc} \quad (2.7)$$

$$V_{br} = \left[S_b - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] V_{dc} \quad (2.8)$$

$$V_{cr} = \left[S_c - \frac{1}{3}(S_a + S_b + S_c) \right] V_{dc} \quad (2.9)$$

Dimana :

V_a, V_b, V_c = tegangan sumber pada fasa **a, b, dan c** secara berurutan

V_{ar}, V_{br}, V_{cr} = tegangan pada fasa **a, b, dan c** secara berurutan pada AFE

V_m = tegangan maksimum sumber

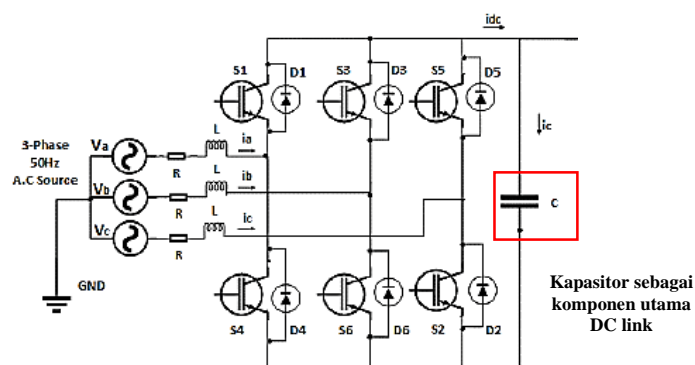
V_{dc} = tegangan DC

S_a, S_b, S_c = nilai fungsi pensaklaran a, b, dan c secara berurutan

Ketika saklar pada bagian atas menyala maka $S_i = 1$, dan Ketika saklar bagian bawah yang menyala, maka $S_i = 0$ ($i = a, b, c$).

4. Tegangan DC Link

Peran DC link atau dapat disebut juga DC bus/ DC filter adalah untuk memperhalus tegangan yang masuk dari AFE. Komponen utama penyusun DC link adalah kapasitor yang dipasang secara paralel seperti pada Gambar 2.3.



Gambar 2.3 DC Link pada AFE

Arus yang mengalir pada kapasitor dalam blok DC link dapat ditentukan dengan persamaan berikut :

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = S_a i_a + S_b i_b + S_c i_c - i_L \quad (2.10)$$

$$v_{xN} = V_{dc} \cdot S_x \quad (2.11)$$

$$v_{xn} - v_n = V_{dc} \cdot (S_x - S_n) \quad (2.12)$$

Dimana :

i_a, i_b, i_c, i_L = arus yang mengalir pada fasa a, b, c, dan beban (*load*) secara berurutan

C = kapasitor pada DC link

v_{xn} = tegangan AFE terhadap negatif DC-Bus (N) (x = a, b, dan c)

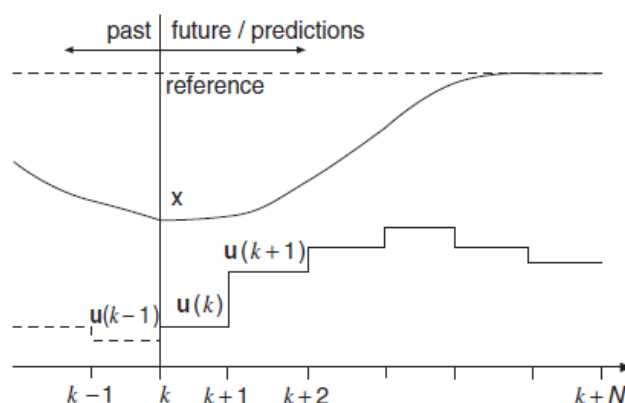
S_x = nilai pensakelaran (x = a,)

S_n = nilai pensakelaran di sisi netral

v_n = tegangan netral (karena tiga fasa tiga kawat maka nilainya nol "0")

2.3 Metode Pengendalian *Model Predictive Control* (MPC)

Sebagian besar metode pengendalian modern menggunakan sistem *closed loop* yang memanfaatkan pengendalian *feedback* pada sistem, salah satunya adalah *model predictive control* (MPC) (Yacoubi *et al.*, 2006). Metode MPC memanfaatkan model sistem untuk memprediksi perilaku masa depan dari variabel yang dikendalikan. Informasi ini digunakan untuk mendapatkan nilai aktuasi yang optimal, sesuai dengan *set point* / nilai referensi (Rodriguez and Cortes, 2012). PC menggunakan pendekatan diskrit dengan optimisasinya untuk meminimalkan nilai *cost function* (Cortés *et al.*, 2008).



Gambar 2.4 Prinsip Kerja MPC

Prinsip kerja MPC pada Gambar 2.4, yakni nilai yang terukur dari sistem diprediksi hingga *horizon* yang telah ditentukan dalam waktu k hingga $k + N$ menggunakan model sistem, kemudian nilai aktuasi optimal dihitung dengan meminimalkan *cost function*. Seluruh proses ini dilakukan secara terus menerus selama periode waktu pengambilan sample dengan mempertimbangkan data baru yang diukur.

2.3.1 Model Waktu Diskrit

Model yang digunakan untuk MPC adalah model waktu diskrit yang dapat dinyatakan sebagai model *state space* sebagai berikut :

$$x(k + 1) = Ax(k) + Bu(k) \quad (2.13)$$

$$y(k) = Cx(k) \quad (2.14)$$

Dengan, \mathbf{A} dan \mathbf{B} adalah matriks yang dapat dikomputasi dari komponen *continuous-time*, dan \mathbf{C} adalah matriks keluaran dari hasil perhitungan diskrit.

Pemodelan proses diskritisasi pada MPC terjadi pada perhitungan tegangan beban berikut.

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + e \quad (2.15)$$

Persamaan tegangan beban, \mathbf{v} , diatas terdiri dari beberapa komponen, yakni resistansi \mathbf{R} , induktansi \mathbf{L} , arus \mathbf{i} dan *back emf* \mathbf{e} , dengan perhitungan dilakukan dalam periode *time sampling* tertentu, T_s . Model diskrit tersebut akan digunakan untuk memprediksi nilai masa depan dari tegangan dan arus pada rentang *time sampling* T_s .

Dari persamaan tegangan beban (2.9), turunan arus di/dt diganti dengan pendekatan Euler,

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1)-i(k)}{T_s} \quad (2.16)$$

Apabila persamaan pada (2.10) disubstitusi dengan persamaan (2.9), maka akan diperoleh persamaan arus prediksi, $i^p(k+1)$.

$$i^p(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (v(k) - \hat{e}(k)) \quad (2.17)$$

Dimana nilai *back emf*, $\hat{e}(k)$ adalah

$$\hat{e}(k) = v(k-1) - \frac{L}{T_s} i_l(k) - \left(R - \frac{L}{T_s}\right) i_l(k-1) \quad (2.18)$$

2.3.2 Cost Function

Tujuan dari pengendalian MPC adalah untuk meminimalkan nilai eror dari selisih nilai parameter yang terukur dengan nilai referensi. Hal tersebut dapat dilakukan dengan meminimalkan nilai *cost function*, g . Beberapa variabel yang dapat dijadikan parameter adalah arus, torsi, daya, dll.

$$g = \|x^* - x^p\| \quad (2.19)$$

Dimana, x^* adalah nilai referensi dan x^p adalah nilai prediksi dari variabel yang dikendalikan.

Simbol $\| \cdot \|$ menunjukkan pengukuran selisih nilai antara prediksi dan referensi dalam nilai absolut, pangkat dua, atau integral dari nilai eror dalam satu kali waktu sampling, seperti berikut.

$$g = |x^* - x^p| \quad (2.20)$$

$$g = (x^* - x^p)^2 \quad (2.21)$$

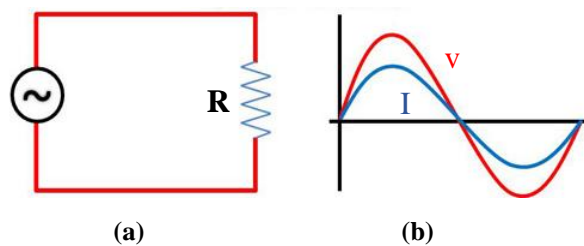
$$g = \left| \int_k^{k+1} (x^*(t) - x^p(t)) dt \right| \quad (2.22)$$

2.4 Beban

Beban elektrik merupakan hal – hal yang megonsumsi daya listrik. Dibawah ini merupakan jenis – jenis beban elektrik yang menjadi pokok pengujian sistem AFE dengan menggunakan metode MPC beserta penjelasannya. Diantaranya, beban resistif, beban induktif, beban kapasitif, beban nonlinear, dan beban dinamis.

2.4.1 Beban Resistif

Beban resistif terdiri dari sumber tegangan dan resistor yang dipasang secara seri sebagai beban.

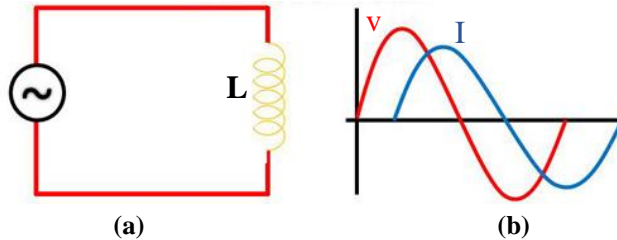


Gambar 2.5 Beban Resistif (a), dan Gelombang Keluaran (b)

Beban resistif hanya mengonsumsi daya aktif saja. Gelombang arus dan tegangan dari rangkaian dengan beban resistif saling berhimpit.

2.4.2 Beban Induktif

Beban induktif hanya mengonsumsi daya reaktif dengan posisi gelombang tegangan dan arus memiliki selisih sebesar 90° satu sama lain.

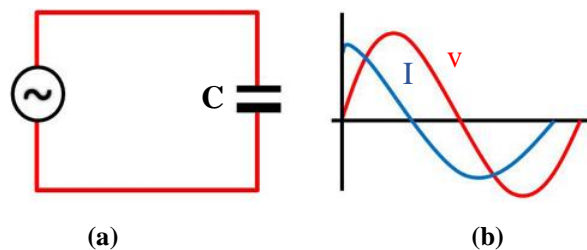


Gambar 2.6 Beban Induktif (a) dan Gelombang Keluaran (b)

Kedua bentuk gelombang mencapai nilai puncaknya pada waktu nilai nol pada waktu yang berbeda dengan gelombang tegangan mendahului gelombang arus (arus *lagging*), sehingga faktor daya dari beban tersebut tidak *unity*.

2.4.3 Beban Kapasitif

Beban kapasitif mirip dengan beban induktif. Gelombang tegangan dan arus pada beban kapasitif memiliki selisih fasa sebesar 90° , hanya saja pada kondisi beban kapasitif arus mendahului gelombang tegangan (arus *leading*).



Gambar 2.7 Beban Kapasitif (a) dan Gelombang Keluaran (b)

2.4.4 Beban Nonlinear

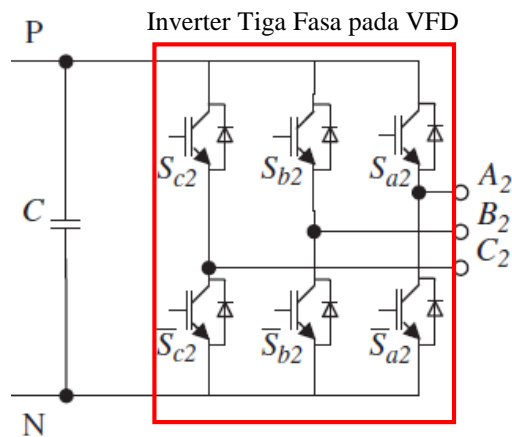
Beban non-linear menghasilkan arus harmonik selain arus AC asli sehingga faktor dayanya kurang dari 1 dan menyebabkan sejumlah gangguan, seperti distorsi bentuk gelombang arus atau tegangan, panas berlebih pada transformator dan perangkat daya lainnya.

Beban nonlinier yang sering ditemukan pada sistem tenaga adalah *converter, variable frequency drive, pengendali DC motor, cycloconverters, power supplies, battery chargers, dan inverter*.

2.4.4.1 Inverter Tiga Fasa

Konverter DC-AC disebut inverter. Fungsi dari inverter adalah sebagai pengkonversi dari inputan tegangan DC menjadi tegangan AC yang simetris sesuai dengan nilai magnitude dan frekuensi yang diinginkan (Muhammad H. Rashid Kumar and Kulkarni, 2014).

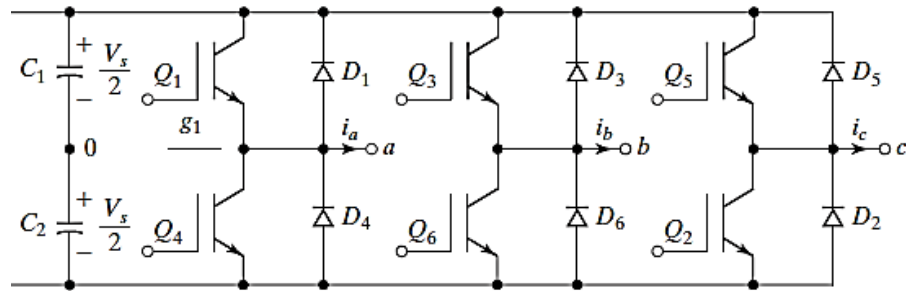
Konstruksi rangkaian inverter tiga fasa pada VFD dapat dilihat pada Gambar 2.8. Dimana, S_{c2} , S_{b2} , dan S_{a2} merupakan sakelar pada fasa **c**, **b**, dan **a** secara berurutan. Sedangkan, A_2 , B_2 , dan C_2 adalah keluaran pada fasa **a**, **b**, dan **c** secara berurutan dari inverter yang nantinya menuju beban.



Gambar 2.8 Rangkaian Inverter Tiga Fasa pada VFD

(Abu-Rub, Malinowski and Al-Haddad, 2014)

Pada Gambar 2.9, ditunjukkan posisi dan penomoran saklar pada inverter. Dimana, $V_s = V_{dc}$, $Q_i =$ saklar i ($i = 1,2,3,\dots,6$) dan $D_i =$ dioda i ($i = 1,2,3,\dots,6$). Sedangkan pada Tabel 2.1 ditunjukkan tabel daerah pensaklaran dan vektor tegangan pada inverter.

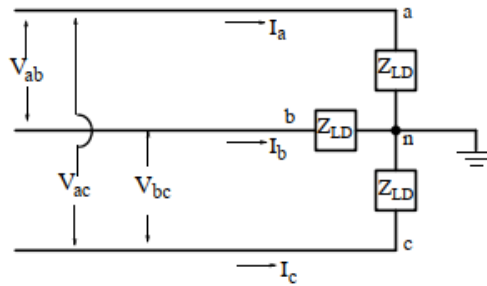


Gambar 2.9 Posisi dan Penomoran Saklar pada Inverter
(Muhammad H. Rashid Kumar and Kulkarni, 2014)

Tabel 2. Daerah Pensaklaran dan Vektor Tegangan

Sa	Sb	Sc	Vektor Tegangan
0	0	0	$V_0 = 0$
1	0	0	$V_1 = \frac{2}{3}V_{dc}$
1	1	0	$V_2 = \frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	0	$V_3 = -\frac{1}{3}V_{dc} + j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
0	1	1	$V_4 = -\frac{2}{3}V_{dc}$
0	0	1	$V_5 = -\frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	0	1	$V_6 = \frac{1}{3}V_{dc} - j\frac{\sqrt{3}}{3}V_{dc}$
1	1	1	$V_7 = 0$

A. Beban Seimbang

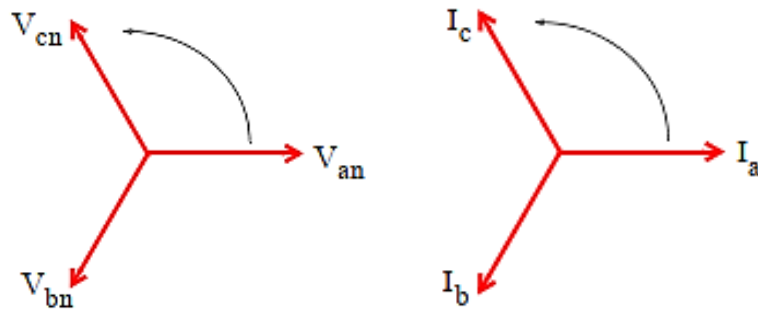


Gambar 2.10 Beban Terhubung-Y

Pada Gambar 2.10, terlihat bahwa beban terhubung-Y (dibaca: *wye*) dan seimbang dengan persamaan sebagai berikut :

$$Z_{LD} = Z_a = Z_b = Z_c \tag{2.23}$$

Beban dalam keadaan seimbang jika ketiga vektor arus atau tegangan sama besar dan saling membentuk sudut 120°. Dibawah ini merupakan diagram fasor arus dan tegangan :



Gambar 2.11 Diagram Fasor Sistem Seimbang

V_{an} , V_{bn} dan V_{cn} adalah tegangan fasa (*line-neutral*). Pada beban yang terhubung-Y tegangan line dan fasa tidak sama, dengan perbedaan tiap sudutnya.

$$V_{an} = V_{an} \angle 0^\circ \tag{2.24}$$

$$V_{bn} = V_{an} \angle -120^\circ \tag{2.25}$$

$$V_{cn} = V_{an} \angle +120^\circ \tag{2.26}$$

Sehingga I_a menjadi,

$$I_a = I_a \angle 0^\circ \quad (2.27)$$

$$I_b = I_a \angle -120^\circ \quad (2.28)$$

$$I_c = I_a \angle +120^\circ \quad (2.29)$$

dengan,

$$I_n = I_a + I_b + I_c \quad (2.30)$$

dan pada beban seimbang, arus yang mengalir adalah sama besar.

$$I = I_a = I_b = I_c \quad (2.31)$$

Sehingga,

$$I_n = I(\angle 0^\circ + \angle -120^\circ + \angle +120^\circ) \quad (2.32)$$

$$I_n = I_a \cdot 0 \quad (2.33)$$

$$I_n = 0 \quad (2.34)$$

Dari penjelasan persamaan diatas, disimpulkan bahwa beban dalam keadaan seimbang karena arus yang mengalir di kawat netral sama dengan nol.

B. Beban Tidak Seimbang

Beban dikatakan dalam kondisi tidak seimbang apabila :

- Ketiga vektor tegangan atau arus sama besar, tetapi tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tegangan atau arus tidak sama besar, tetapi membentuk sudut 120° satu sama lain.
- Ketiga vektor tegangan atau arus tidak sama besar, dan tidak membentuk sudut 120° satu sama lain.

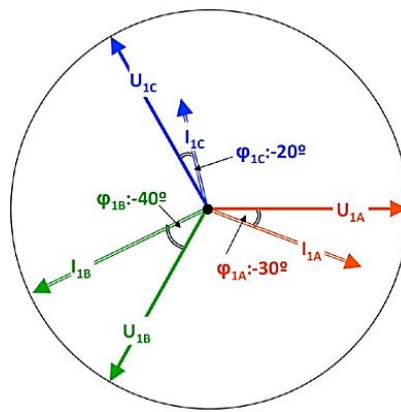
Dari ketiga kriteria di atas, maka nilai impedansi tidak sama, dan dinyatakan sebagai berikut :

$$Z_{LD} \neq Z_a \neq Z_b \neq Z_c \quad (2.35)$$

Karena nilai impedansi beban tidak sama tiap fasanya, maka nilai arusnya menjadi,

$$I \neq I_a \neq I_b \neq I_c \quad (2.36)$$

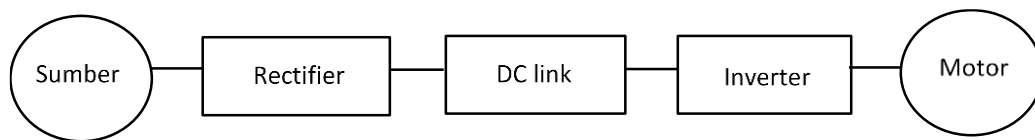
Dibawah ini merupakan diagram fasor arus dan tegangan yang tidak seimbang :



Gambar 2.12 Diagram Fasor Sistem Tidak Seimbang

2.4.4.2 Variable Frequency Drive (VFD)

Konverter daya yang biasa digunakan untuk mengatur kinerja mesin listrik pada proses industri, baik dari frekuensi, tegangan, arus, hingga torsi motor disebut *variable frequency drive* atau disingkat VFD (Chimonyo *et al.*, 2018). Rangkaian VFD terdiri dari tiga blok proses dan output yang dihasilkan digunakan sebagai inputan pada motor induksi. Blok proses tersebut antara lain *rectifier*, DC link, dan inverter (Islam, 2019). Topologi VFD pada motor induksi yang menggunakan dioda pada blok penyearahannya (*rectifier*), digambarkan pada Gambar 2.13.



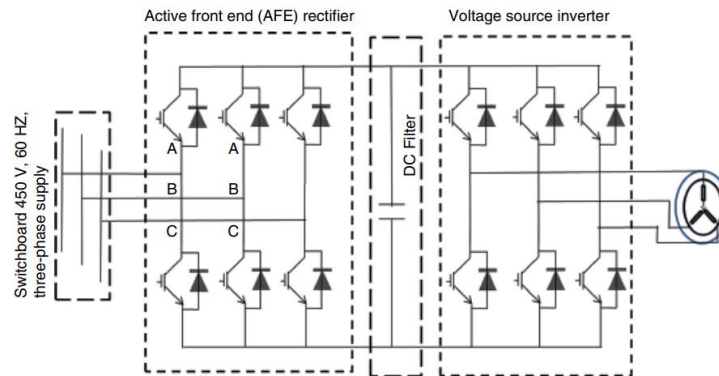
Gambar 2.13 Topologi VFD pada Motor Induksi

Rectifier atau penyearah digunakan untuk mengkonversi tegangan AC dari sumber menjadi DC, yang kemudian masuk ke blok DC link. Pada *rectifier*, komponen yang digunakan biasanya adalah dioda (Muhammad H. Rashid Kumar and Kulkarni, 2014).

Pada DC link, tegangan DC yang masuk diperhalus menggunakan kapasitor dan selanjutnya masuk ke blok inverter (Islam, 2019).

Inverter mengubah tegangan DC menjadi AC dengan komponen penyusun utamanya adalah semikonduktor aktif seperti *thyristor*, IGBT, BJT dan lain – lain. Inverter tidak benar – benar mengubah tegangan DC menjadi AC dengan bentuk gelombang sinusoidal murni, melainkan memanipulasi bentuk gelombang pulsa akibat proses gating agar menyerupai gelombang sinusoidal yang kemudian menuju motor induksi dan digunakan sebagai inputan pada motor (Muhammad H. Rashid Kumar and Kulkarni, 2014).

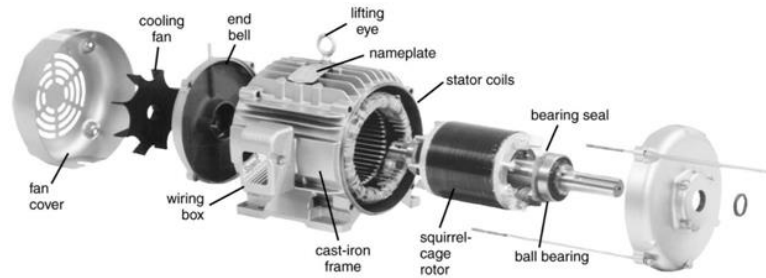
Blok penyearah (*rectifier*) menggunakan komponen semikonduktor aktif *Integrated Gate Bipolar Transistor* (IGBT) sebagai pengganti dioda, sehingga disebut sebagai *Active Front End* (AFE). Selain itu, blok lain yang terdapat pada VFD adalah, *DC link* dan inverter tiga fasa. Rangkaian VFD dengan AFE digambarkan seperti pada Gambar 2.14.



Gambar 2.14 Rangkaian VFD dengan AFE

(Islam, 2019)

VFD dihubungkan langsung dengan motor sebagai beban. Pada penelitian ini, jenis motor yang digunakan adalah motor induksi tiga fasa. Bagian – bagian motor induksi dapat dilihat pada Gambar 2.15.



Gambar 2.15 Bagian-Bagian Motor Induksi

Motor pada Gambar 2.15, dapat bekerja dikarenakan konduktor rotor terinduksi oleh medan putar magnet yang terdapat pada bagian stator. Oleh karena itu, motor ini disebut juga motor induksi. Pada saat beroperasi, motor ini mempunyai perbedaan putaran antara medan stator (N_s) dan putaran pada rotor (N_r) oleh karena itu disebut juga motor asinkron. Perbedaan putarannya biasanya $N_s > N_r$ kondisi ini dinamakan slip.

Apabila ketiga fasa pada belitan stator diberi tegangan tiga fasa seimbang maka medan putar akan terjadi di stator, kecepatan putarannya ditulis dalam persamaan berikut :

$$N_s = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (2.37)$$

Dimana f dan p adalah frekuensi tegangan di stator dan jumlah kutub pada motor.

Perbedaan kecepatan antara N_s dan N_r disebut dengan slip, dapat dinyatakan dengan persamaan :

$$S = \frac{(N_s - N_r)}{N_s} \cdot 100\% \quad (2.38)$$

Perbedaan kecepatan putarannya adalah $N_s > N_r$. Jika $N_s = N_r$ maka tidak terjadi induksi dan arus tidak mengalir ke kumparan rotor.

2.5 Harmonisa

Dalam sistem tenaga listrik, harmonisa adalah tegangan atau arus sinusoidal yang frekuensinya merupakan kelipatan bilangan bulat dari frekuensi dasar yang terdistorsi. Frekuensi harmonik di jaringan listrik sering menjadi penyebab masalah kualitas daya. Harmonik menyebabkan distorsi bentuk gelombang tegangan dan arus, yang berdampak buruk pada peralatan listrik (Das, 2015).

2.5.1 Standar Pengukuran Emisi Harmonisa IEEE-519 2014

Standar kualitas tenaga listrik adalah kesepakatan formal antara industri, pengguna, dan pemerintah mengenai prosedur yang tepat untuk menghasilkan, menguji, mengukur, memproduksi, dan mengkonsumsi tenaga listrik. (Masoum and Fuchs, 2015).

Standar penetapan nilai harmonisa pada sistem tenaga listrik dan penerapannya untuk mengukur kualitas daya yang dihasilkan merujuk pada standar IEEE-519 2014. Ada dua kriteria yang digunakan dalam IEEE-519 2014 untuk mengevaluasi distorsi harmonisa, antara lain :

- Pembatasan arus harmonik yang dapat ditransmisikan oleh pengguna ke sistem utilitas (THDi), dan
- Pembatasan distorsi tegangan yang harus disediakan oleh utilitas kepada pengguna (THDv).

Tabel 2. Standar IEEE-519 Batas Harmonik pada Arus untuk Beban Nonlinear pada PCC dengan Beban Lain pada Tegangan 2.4-69 kV

I_{sc}/I_L	Orde Harmonik (ganjil)					THDi
	$h < 11$	$11 \leq h < 17$	$17 \leq h < 23$	$23 \leq h < 25$	$35 \leq h$	
< 20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0

Tabel 2. Standar IEEE-519 Batas Harmonik untuk Konsumsi Umum

	2.3-69 kV	69-138 kV	> 138 kV
harmonik individu	3.0	1.5	1.0
THDv	5.0	2.5	1.5

2.5.2 Harmonisa dan Kualitas Daya Listrik

Salah satu penyebab utama dari kualitas daya yang buruk adalah harmonisa. Harmonisa dapat menambah nilai rms dan nilai puncak gelombang, yang berarti peralatan dapat menerima tegangan puncak yang sangat tinggi sehingga rentan terjadi kegagalan. Tegangan yang tinggi juga dapat memaksa komponen untuk beroperasi di daerah saturasinya, menghasilkan harmonisa dan gangguan tambahan. (Wilamowski and Irwin, 2016).

Pengertian distorsi secara umum adalah perubahan dalam bentuk gelombang yang terjadi. Salah satu distorsi yang terjadi pada sistem tenaga listrik adalah distorsi harmonisa. Distorsi harmonisa disebabkan oleh beban-beban nonlinear dalam sistem tenaga listrik. Gelombang arus yang mengandung komponen harmonisa disebut arus yang terdistorsi. (Warman, 2013).

Total Harmonic Distortion (THD), adalah perbandingan antara nilai RMS dari seluruh komponen harmonisa terhadap nilai RMS fundamentalnya. Sebagai contoh, jika arus non linear mempunyai komponen fundamental I_1 dan komponen harmonisanya $I_2, I_3, I_4, I_5, \dots$, maka nilai RMS harmonisanya adalah:

$$I_H = \sqrt{(I_2^2 + I_3^2 + I_4^2 + I_5^2 + \dots)} \quad (2.39)$$

$$\text{THD} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{n=\infty} X_n^2}}{X_1} \times 100\% \quad (2.40)$$

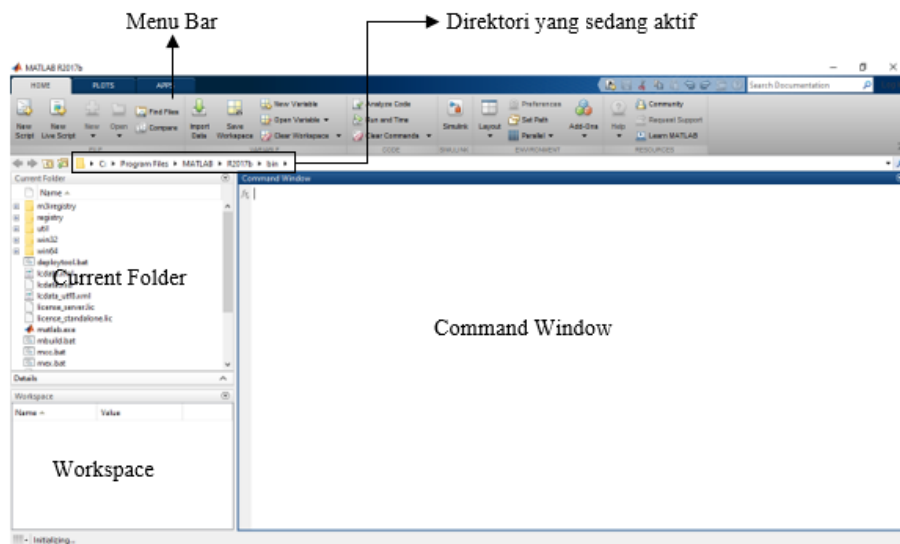
Dimana X_n adalah nilai RMS arus atau tegangan harmonisa ke-n dan X_1 adalah nilai arus atau tegangan pada frekuensi fundamental.

Singkatnya, harmonisa mempengaruhi kualitas daya listrik yang dihasilkan oleh suatu sistem. Hal tersebut terjadi karena apabila nilai harmonisa pada variabel arus atau tegangan pada sistem tersebut besar, maka nilai faktor daya menjadi turun dan kualitas dayanya dikatakan kurang bagus. Sebaliknya, apabila nilai harmonisa pada variabel arus atau tegangan sistem kecil, maka dapat dipastikan bila nilai faktor dayanya mendekati 1 (*unity*), sehingga dapat disimpulkan bila kualitas daya pada sistem tersebut bagus.

2.6 Lingkungan MATLAB / Simulink

2.6.1 MATLAB

MATLAB (*Matrix Laboratory*) adalah sebuah program untuk analisis dan komputasi numerik dan merupakan suatu bahasa pemrograman matematika lanjutan yang dibentuk dengan dasar pemikiran menggunakan sifat dan bentuk matriks (Tjolleng, 2017). MATLAB merupakan merk software yang dikembangkan oleh Mathworks.Inc. merupakan software yang paling efisien untuk perhitungan numerik berbasis matriks (Tjolleng, 2017).



Gambar 2.16 Tampilan Awal Jendela MATLAB

Tata letak default (Gambar 2.16) terdiri dari empat jendela berikut yang ditampilkan di bawah Toolstrip: *Command window* (jendela yang lebih besar), Jendela *Current Folder* (di kiri atas), Jendela *Details* dan Jendela *Workspace* (di bagian bawah jangan sampai). Daftar beberapa jendela MATLAB dan fungsinya diberikan pada Tabel 2.4.

Tabel 2. Daftar Beberapa Jendela MATLAB dan Fungsinya

JENDELA	FUNGSI
<i>Command Window</i>	Jendela utama MATLAB terbuka ketika MATLAB dimulai.
<i>Figure Window</i>	Terbuka secara otomatis ketika perintah grafik dijalankan, dan berisi grafik yang dibuat oleh perintah ini.
<i>Editor Window</i>	Jendela Editor digunakan untuk menulis dan mengedit program.
<i>Help Window</i>	Berisi informasi bantuan. Jendela ini dapat dibuka dari ikon <i>Help</i> di <i>Toolstrip</i> dari <i>Command Window</i> atau <i>toolbar</i> .
<i>Command History Window</i>	Perintah log masuk di <i>Command Window</i>
<i>Workspace Window</i>	Memberikan informasi tentang variabel yang disimpan
<i>Current Folder Window</i>	menunjukkan file di folder saat ini

2.6.2 Simulink

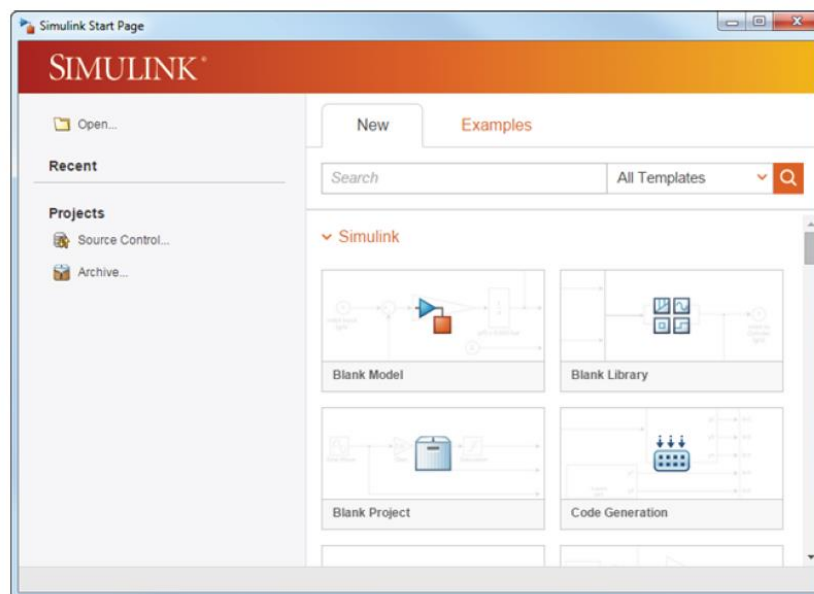
Simulink adalah lingkungan diagram blok untuk simulasi multidomain dan *Model-Based Design*. Simulink mendukung desain tingkat sistem, simulasi, pembuatan kode otomatis, dan pengujian berkelanjutan dan verifikasi sistem tertanam. Simulink juga menyediakan editor grafis, pustaka blok yang dapat disesuaikan, dan pemecah untuk pemodelan dan simulasi sistem dinamis. Simulink terintegrasi dengan MATLAB®, sehingga pengguna dapat memasukkan algoritma MATLAB ke dalam model dan mengekspor hasil simulasi ke MATLAB untuk analisis lebih lanjut.

Untuk menjalankan Simulink, kita harus membuka MATLAB terlebih dahulu. Terdapat dua cara untuk masuk pada lingkungan kerja Simulink. Pertama bisa menggunakan *command window* dengan mengetik *Simulink*, atau dengan mengklik ikon Simulink pada *menu bar*, berikut merupakan letak ikon Simulink pada Gambar 2.17.



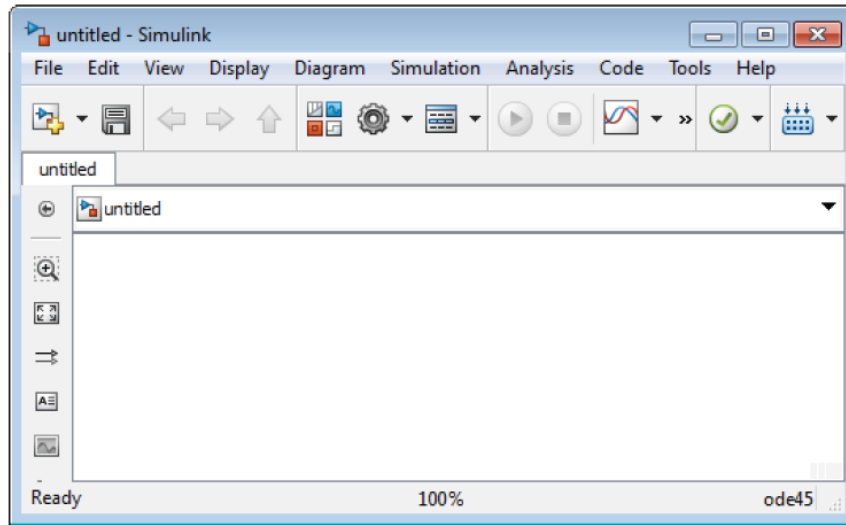
Gambar 2.17 Ikon Simulink dalam Jendela MATLAB

Setelah perintah Simulink dieksekusi, maka akan muncul tampilan *simulink start page* seperti Gambar 2.18, kemudian pilih *blank model* untuk memulai kerja dengan keadaan jendela kerja awal pada Simulink.

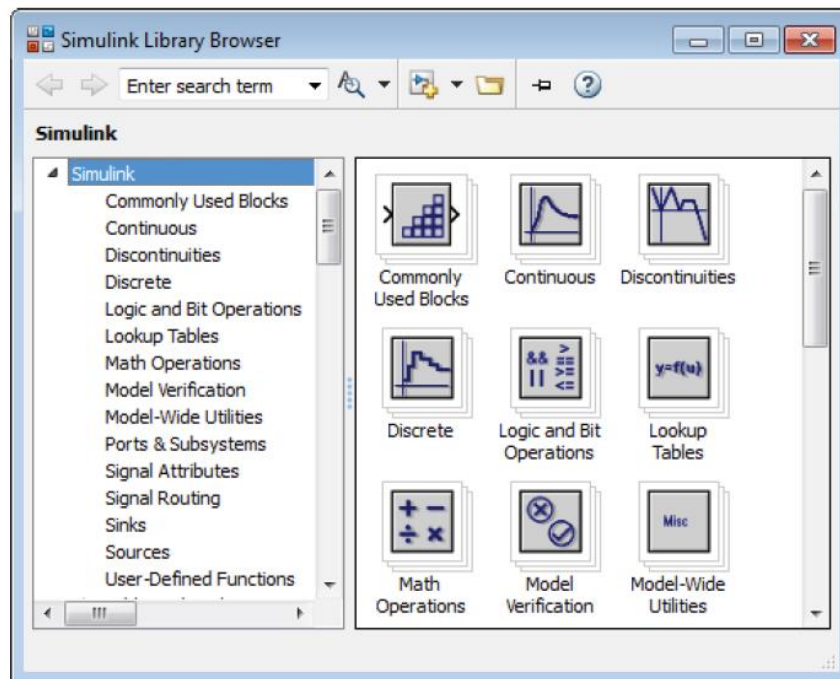


Gambar 2.18 Tampilan *Start Page* pada Simulink

Gambar 2.19 merupakan tampilan jendela kerja Simulink. Pada Jendela kerja Simulink adalah tempat dimana blok diagram dirangkai dan disimulasikan. Blok komponen yang akan dirangkai dapat ditemukan pada *library browser* pada *menu bar* Simulink di Gambar 2.20. Setelah tampil *library browser*, maka pilih blok komponen yang dibutuhkan.



Gambar 2.19 Tampilan Jendela Kerja Simulink



Gambar 2.20 Tampilan Jendela *Library Browser* pada Simulink

2.7 Penelitian Terkait

Berikut merupakan penelitian – penelitian terkait pemodelan konverter *active front end* (AFE) menggunakan MPC yang telah dilakukan sebelumnya.

Tabel 2. Penelitian Terkait Pemodelan Konverter AFE dengan Kendali MPC

Judul	Penulis, Tahun	Pembahasan
<i>An Improved Active Front End Rectifier Using Model Predictive Control</i>	M. Parvez, S. Mekhilef, Nadia M. L.Tan, dan Hirofumi Akagi. (2015)	<p>Pada penelitian ini telah dilakukan percobaan AFE <i>rectifier</i> berdaya 3.0 kW dengan pengendaliannya menggunakan MPC dan menunjukkan efisiensi sebesar 96.82%, THD arus masukan sebesar 4.0%, dan ripple tegangan DC yang sangat rendah. Perbandingan nilai efisiensi antara pengendalian PWM menggunakan metode MPC lebih efektif untuk diterapkan.</p> <p>Dilakukan pengujian kestabilan dengan metode MPC. Hasilnya menunjukkan bahwa pengendalian sistem AFE <i>rectifier</i> memiliki respon dinamis yang sangat cepat.</p>
<i>Model Predictive Control of an Active Front End Rectifier with Unity Displacement Factor</i>	S. M. Muslem Uddin, Parvez Akter, S. Mekhilef, M. Mubin, M. Rivera, dan J. Rodriguez. (2013)	<p>Penelitian ini membahas tentang <i>finite control set model predictive control</i> dari <i>active front end</i> (AFE) <i>rectifier</i> dengan pemindahan sudut fasa dari tegangan dan arus masukan.</p> <p>Dalam algoritma pengendaliannya, sifat diskrit konverter daya digunakan untuk memprediksi perilaku variabel sistem input di masa mendatang yakni menggunakan metode <i>model predictive control</i> (MPC).</p> <p>Selain itu, metode MPC juga berfungsi untuk memilih kondisi pensaklaran untuk konverter dengan meminimalkan nilai fungsi cost dalam <i>time sampling</i> tertentu.</p> <p>Hasilnya, Algoritma kontrol prediktif yang divalidasi melalui simulasi menunjukkan kontrol potensial dan faktor daya masukan yang <i>unity</i>.</p>

<p><i>Model Predictive Control of PWM AC/DC Converters for Bi-directional Power Flow Control in Microgrids</i></p>	<p>Xiaolong Shi, Jianguo Zhu, Li Li, dan Yanqing Qu. (2015)</p>	<p>Pada penelitian ini membahas tentang konverter tiga fasa untuk konversi AC / DC pada mikrogrid menggunakan model pengendalian prediktif (MPC) yang lebih kuat dan fleksibel.</p> <p>Pada penelitian ini juga menjelaskan studi komparatif dari pengendalian berbasis MPC dan DPC konvensional berdasarkan tabel pensaklaran dengan fokus pada kondisi tunak dan kinerja transien dari kendali aliran daya dua arah (<i>bidirectional power flow</i>).</p> <p>Hasil simulasi menunjukkan bahwa DPC berbasis MPC memiliki performa yang lebih baik, sehingga lebih sesuai untuk mengendalikan konverter AC / DC pada mikrogrid dibandingkan dengan DPC konvensional berbasis tabel pensaklaran.</p>
<p><i>Predictive Control of Bidirectional Voltage Source Converter with Reduced Current Harmonics and Flexible Power Regulation Under Unbalanced Grid</i></p>	<p>Nan Jin, Chun Gan, dan Leilei Guo. (2018)</p>	<p>Penelitian ini menjelaskan peningkatan pada <i>model predictive current control</i> (MPCC) untuk grid yang terhubung pada <i>bidirectional voltage source converter</i> (GC-BVSC) ketika tegangan grid yang tidak seimbang muncul. Dalam keadaan tegangan grid yang tidak seimbang, harmonisa pada arus meningkat secara signifikan, dan pada daya aktif /daya reaktif frekuensi ripplanya menjadi dua kali lipat, sehingga dapat memengaruhi kualitas daya yang dihasilkan.</p> <p>Untuk mengurangi arus harmonik dan fluktuasi daya, maka digunakan metode MPCC.</p> <p>Hasil simulasi yang dilakukan pada platform tenaga elektronik-profesional atau disebut PEPRO, memverifikasi keefektifan skema yang diusulkan.</p>

<p><i>Close Loop Control of Three Phase Active Front End Converter using SVPWM Technique</i></p>	<p>Viraj Selarka, Prem Shah, Divyesh J. Vaghela, dan Manisha T. Shah (2016)</p>	<p>Penelitian ini menjelaskan tentang strategi <i>closed loop space vector modulation</i> untuk <i>Active Front End Converter</i> (AFE). Nilai faktor daya yang rendah dan nilai harmonik yang tinggi adalah kelemahan utama dari konverter konvensional. Untuk mengatasi masalah ini, SVPWM dapat diterapkan. Percobaan dilakukan dengan simulasi pada MATLAB /Simulink.</p> <p>Hasil simulasi menunjukkan faktor daya <i>unity</i> tercapai dan algoritma kontrol yang diusulkan memberikan respon dinamis dan stabil yang diinginkan. Dalam kondisi pembebanan dinamis, tegangan keluaran tetap konstan yang menunjukkan keefektifan teknik kontrol yang diusulkan. % THD yang diperoleh pada arus masukan tiga fasa adalah 2,30% yang jauh lebih kecil dari yang diamati pada penyearah jembatan dioda dan juga dalam batas yang ditentukan oleh standar IEEE-519.</p>
<p><i>Predictive Direct Power Control of Three-Phase Pulse width Modulation (PWM) Rectifier Using Space-Vector Modulation (SVM)</i></p>	<p>Abdelouahab Bouafia, Jean-Paul Gaubert, dan Fateh Krim (2010)</p>	<p>Penelitian ini menggunakan metode <i>direct power control</i> (DPC) pada penyearah pensaklaran <i>space vector pulse width modulation</i> (SVPWM). Skema DPC yang dikembangkan didasarkan pada strategi kontrol prediktif untuk mencapai kontrol langsung daya aktif dan reaktif sesaat dari konverter. Keuntungan utama dari kontrol yang diusulkan adalah tidak perlu menggunakan tabel switching yang telah ditentukan dan vektor tegangan atau posisi fluks virtual, loop kontrol daya aktif dan reaktif berbasis PI tidak diperlukan dan frekuensi switching konstan. Kontrol daya langsung prediktif yang diusulkan diuji baik dalam simulasi dan eksperimental dan dibandingkan dengan DPC menggunakan tabel switching. Hasilnya telah membuktikan kinerja yang sangat baik, dan memverifikasi validitas skema DPC yang diusulkan, yang jauh lebih baik daripada DPC konvensional dengan menggunakan tabel switching.</p>

Penelitian – penelitian yang telah dilakukan diatas lebih terfokus pada bagian beban, sedangkan bila dibandingkan dengan penelitian yang saat ini sedang dilakukan, fokus utamanya adalah pada bagian sumber agar harmonisa yang dihasilkan baik pada bagian tegangan maupun arus menjadi kecil dan tidak mempengaruhi kinerja sistem. Selain itu, pada penelitian ini parameter yang dikendalikan oleh metode MPC adalah kesetabilan daya pada bagian sumber agar nilai faktor dayanya tetap bagus, yaitu mendekati 1 atau *unity* walaupun beban yang dipasang berbeda dan berubah-ubah.