

Pemodelan *Active Front End Converter (AFE)* Tiga-Fasa Tiga-Kaki menggunakan Kendali *Model Predictive Control (MPC)*

ORYZA SATIVA, ASEP ANDANG*, ABDUL CHOBIR

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Siliwangi, Indonesia
Email: orizazasativa10@gmail.com; *andhangs@unsil.ac.id

Received 2 Desember 2022 | *Revised* 3 Januari 2023 | *Accepted* 6 Januari 2023

ABSTRAK

Penelitian ini membahas Active Front End Converter (AFE) tiga-fasa tiga-kaki menggunakan kendali Model Predictive Control (MPC) pada pensakelaran converter yang dapat mengurangi nilai harmonisa dan memperbaiki faktor daya pada jaringan. Kendali MPC digunakan untuk melakukan prediksi tegangan dan arus AFE dengan cara memasukkan vektor tegangan yang dihasilkan oleh sakelar konverter ke dalam model state-space diskrit dan dievaluasi menggunakan cost function. Simulasi model dilakukan pada beberapa kondisi, yaitu simulasi beban resistif, beban induktif, beban kapasitif, beban nonlinear, dan variable frequency drive (VFD) dengan motor induksi. Simulasi beban resistif, THDv dan THDi secara berurutan nilai rata-ratanya sebesar 0.02% dan 0.45%, beban induktif, 0.01% dan 1.92%, beban kapasitif, 0.01% dan 1.92%, beban nonlinear, 0.03% dan 1.23%, dan beban VFD dengan motor induksi sebesar 0.04% dan 1.18%. Faktor daya pada simulasi beban bervariasi menghasilkan unity. Dari hasil simulasi didapatkan kesimpulan kendali MPC pada AFE mampu meningkatkan kualitas daya listrik.

Kata kunci: Harmonisa, Faktor Daya, AFE, MPC, Model Vektor Ruang

ABSTRACT

This study discusses a three-phase three-leg Active Front End Converter (AFE) using Model Predictive Control (MPC) which controls converter switching to reduce harmonic values and improve the power factor on the network. MPC is used to predict the AFE voltage and current by entering the voltage vector generated by the converter switch into a discrete state-space model and evaluated using a cost function. The simulations of the model have been done under several conditions, resistive loads, inductive loads, capacitive loads, nonlinear loads, and variable frequency drive (VFD) with an induction motor. Resistive load simulations, THDv and THDi respectively, the average values are 0.02% and 0.45%, inductive load, 0.01% and 1.92%, capacitive load, 0.01% and 1.92%, nonlinear load, 0.03% and 1.23%, and load VFD with induction motor is 0.04% and 1.18%. The power factor in the varying load simulation results is unity. From the simulation results, it can be concluded that MPC control on AFE can improve electrical power quality.

Keywords: Harmonics, Power Factor, AFE, MPC, Space Vector Model

1. PENDAHULUAN

Salah satu konverter daya listrik yang sering digunakan adalah *rectifier* atau penyearah, penyearah ini berfungsi untuk mengubah gelombang AC menjadi DC. *Rectifier* konvensional menggunakan dioda sebagai komponen utama penyusunnya. Namun, *rectifier* tersebut masih memiliki beberapa kekurangan, seperti harmonisa pada sistem, dan faktor daya pada catu daya sumber kurang baik **(Blaabjerg, 2018)(Qiu, dkk, 2020)**.

Kekurangan *rectifier* konvensional tersebut dapat diatasi dengan mengganti komponen dioda dengan semikonduktor aktif. Salah satu komponen semikonduktor tersebut adalah *Integrated Gate Bipolar Transistor* (IGBT), dan rangkaian ini disebut *Active Front End* (AFE) **(Davari, dkk, 2018)**.

Penggunaan IGBT sebagai penyusun AFE karena IGBT mampu mengatasi beberapa kekurangan pada *rectifier* konvensional yang masih menggunakan dioda. Kelebihan IGBT antara lain dapat memperbaiki faktor daya (*power factor correction*), mengurangi harmonisa, dan dapat mengalirkan daya listrik pada dua arah (*bidirectional power flow*) **(Chimonyo, dkk, 2018) (Cortés, dkk, 2008)**.

Konverter pada suatu sistem biasanya menggunakan pengendalian tertentu untuk menghasilkan keluaran yang diinginkan **(Song, dkk, 2016)**. Salah satu metode pengendalian yang cukup populer pada pengendalian konverter modern adalah *model predictive control* atau disingkat MPC **(Islam, 2019) (Karamanakos, dkk, 2013) (Lee, 2011) (Vazquez, dkk, 2017)**.

Keunggulan dari metode kendali MPC antara lain, konsep yang mudah dipahami, implementasi yang sederhana, dan respon dinamis yang cepat **(Revuelta, dkk, 2015)**. Sehingga, MPC cocok diterapkan pada konverter daya karena efisiensi sistem dan kualitas keluaran lebih baik **(Rashid, 2014)**. Kendali MPC ini mulai diterapkan dalam filter daya *hybrid* **(Andang, dkk., 2022) (Antoniewicz & Rafal, 2017) inverter (Andang, dkk., 2022) (Mohamed, dkk., 2019)**, dan konverter DC **(Dehghanzadeh, dkk, 2018) (Zhou, dkk, 2020)**.

Penelitian ini menjelaskan tentang bagaimana konverter AFE dengan menggunakan kendali MPC dapat menghasilkan nilai keluaran yang diinginkan, seperti nilai harmonisa pada bagian jaringan menjadi lebih kecil, nilai faktor daya yang mendekati 1 atau *unity* dan gelombang keluaran yang memiliki sedikit *noise* atau gangguan **(Singh, dkk, 2008)**.

2. METODE

2.1 Space Vector Model

Konverter *Active Front End* adalah penyearah aktif yang dikendalikan sepenuhnya dengan transistor daya IGBT dan terhubung ke tegangan catu daya tiga fasa. Arus dan tegangan yang menuju sumber atau sebaliknya harus melalui filter RL yang terdiri dari resistor R_s , dan induktor L_s . Persamaan untuk rangkaian pada Gambar 1, dapat ditulis dalam bentuk *space vector* pada Persamaan (1), (2) dan (3)

$$v_{sa} = L_s \frac{di_{sa}}{dt} + R_s i_{sa} + v_{aN} - v_{nN} \quad (1)$$

$$v_{sb} = L_s \frac{di_{sb}}{dt} + R_s i_{sb} + v_{bN} - v_{nN} \quad (2)$$

$$v_{sc} = L_s \frac{di_{sc}}{dt} + R_s i_{sc} + v_{cN} - v_{nN} \quad (3)$$

Tegangan AFE, V_{afe} , ditentukan oleh keadaan pensakelaran konverter dan tegangan DC *link*, yang dapat dinyatakan dengan Persamaan (4)(5) dan (6):

$$v_{aN} = V_{dc} \cdot S_a \quad (4)$$

$$v_{bN} = V_{dc} \cdot S_b \quad (5)$$

$$v_{cN} = V_{dc} \cdot S_c \quad (6)$$

Dimana, V_{dc} adalah tegangan DC *link* dan S_{afe} (S_a , S_b , dan S_c) adalah vektor pensakelaran tiap fasa dari konverter AFE.

Rangkaian konverter AFE sistem hanya memiliki tiga kawat dan tidak memiliki kawat netral. Hal ini mempermudah proses kalkulasi untuk mendapatkan nilai tegangan AFE, seperti pada Persamaan (7) berikut.

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = v_{dc} \begin{bmatrix} S_a - S_n \\ S_b - S_n \\ S_c - S_n \end{bmatrix} \quad (7)$$

Dimana, v_{an} , v_{bn} , dan v_{cn} adalah tegangan terminal AFE dan S_n adalah sakelar yang terdapat pada kawat netral, yang bernilai "0".

Merujuk pada penjabaran *space vector* rangkaian AFE dan matriks tegangan terminal pada sisi AFE diatas, maka dapat disimpulkan persamaan tegangan terminal AFE secara menjadi Persamaan (8)

$$\begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} & -\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{3} & \frac{2}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} [v_{dc}] \quad (8)$$

Persamaan (1), (2) dan (3) ditulis ulang sehingga didapatkan Persamaan (9) dan (10)

$$L_s \frac{di_s}{dt} = v_s - v_{afe} - R_s i_s \quad (9)$$

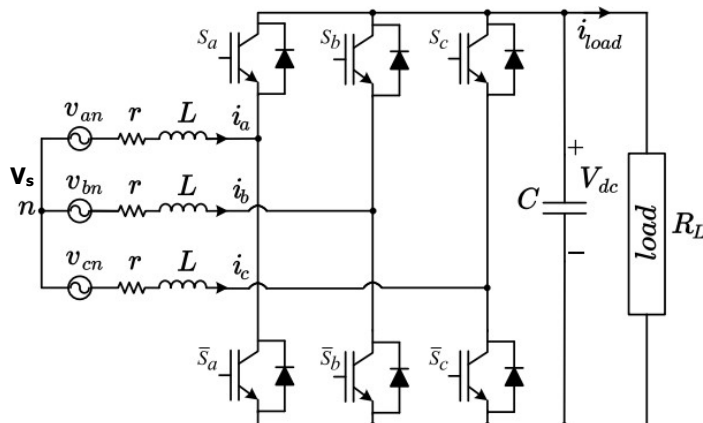
$$\frac{di_s}{dt} = -\frac{R_s}{L_s} i_s + \frac{1}{L_s} v_s - \frac{1}{L_s} v_{afe} \quad (10)$$

Dimana, i_s adalah vektor arus input, v_s adalah tegangan saluran suplai, dan v_{afe} adalah tegangan yang dihasilkan oleh konverter.

Untuk menghilangkan derivatif yang menempel pada i_s , maka persamaan di atas harus dikalikan dengan T_s (*time sampling*). Sehingga, model matematika konverter menjadi persamaan diskrit, seperti pada Persamaan (11).

$$i_s = -\frac{R_s T_s}{L_s} i_s + \frac{T_s}{L_s} v_s - \frac{T_s}{L_s} v_{afe} \quad (11)$$

Pemodelan Active Front End Converter (AFE) Tiga-Fasa Tiga-Kaki menggunakan Kendali Model Predictive Control (MPC)



Gambar 1. Rangkaian Sistem AFE

2.2 Switching State

Sinyal pensakelaran S1, S3, S5, dan S2, S4, S6 beroperasi secara berlawanan. Jika S1 dalam keadaan hidup (*switching state* = 1), maka S2 harus dalam keadaan mati (*switching state* = 0). Karena jika S1 dan S2 keduanya hidup maka akan mengakibatkan *short circuit*, sedangkan jika keduanya mati maka tidak menghantarkan arus beban baik dari titik P maupun ke titik N. Adapun hubungan pensakelaran dengan vektor tegangan dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Kombinasi Pensakelaran Konverter AFE

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	$V_7 = 0$

Sa, Sb, dan Sc merupakan kondisi pensakelaran konverter AFE untuk setiap fasanya. Sa terdiri dari S1 dan S2, Sb terdiri dari S3 dan S4, dan Sc terdiri dari S5 dan S6. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, apabila sakelar pada suatu fasa harus bekerja secara berlawanan atau komplementer. Kondisi pensakelaran bernilai "0" apabila S1, S3, S5 "off" dan S2, S4, S6 "on". Sedangkan sebaliknya, kondisi pensakelaran bernilai "1" apabila S1, S3, S5 "on" dan S2, S4, S6 "off".

2.3 Model Predictive Control (MPC)

Melihat dari rumus *state space* Persamaan (1),(2) dan (3), Model dinamis dari arus konverter yang didapatkan dari persamaan tersebut menjadi Persamaan (12):

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = -L_{eq}^{-1} R_{eq} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + L_{eq}^{-1} \begin{bmatrix} v_{sa} \\ v_{sb} \\ v_{sc} \end{bmatrix} - L_{eq}^{-1} \begin{bmatrix} v_{an} \\ v_{bn} \\ v_{cn} \end{bmatrix} \quad (12)$$

dengan nilai R_{eq} dan L_{eq} bernilai sesuai Persamaan (13) :

$$R_{eq} = \begin{bmatrix} R_f & 0 & 0 \\ 0 & R_f & 0 \\ 0 & 0 & R_f \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$Q_{eq} = \begin{bmatrix} L_f & 0 & 0 \\ 0 & L_f & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \quad (14)$$

Dimana, $A = \frac{-R_{eq}}{L_{eq}}$ dan $B = \frac{1}{L_{eq}}$. Sehingga, apabila diubah kedalam bentuk nilai Φ dan Γ secara berurutan menjadi, $\Phi = 1 - AT_s$ dan $\Gamma = BT_s$. Rumus arus prediksi dapat ditulis dalam bentuk matriks menjadi seperti Persamaan (15).

$$\begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = \Phi \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \Gamma \begin{bmatrix} v_{sa} - v_{an} \\ v_{sb} - v_{bn} \\ v_{sc} - v_{cn} \end{bmatrix} \quad (15)$$

Nilai *cost function* yang dikendalikan dalam penelitian ini adalah variabel daya listrik. Hal ini untuk mencari *error* antara nilai prediksi terhadap referensinya. Berikut Persamaan (16) merupakan persamaan *cost function* AFE, g_{afe} , dengan daya listrik sebagai parameter nya :

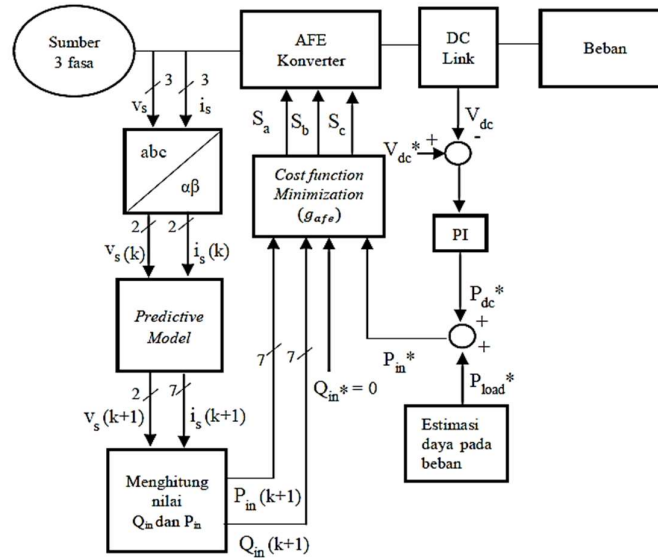
$$g_{afe} = |Q_{in}^* - Q^p(k+1)| + |P_{in}^* - P^p(k+1)| \quad (16)$$

Dengan, nilai $Q^p(k+1)$ adalah daya reaktif hasil prediksi, Q_{in}^* adalah daya reaktif referensi, $P^p(k+1)$ adalah daya aktif hasil prediksi, dan P_{in}^* adalah daya aktif referensi.

2.4 Cara Kerja Sistem

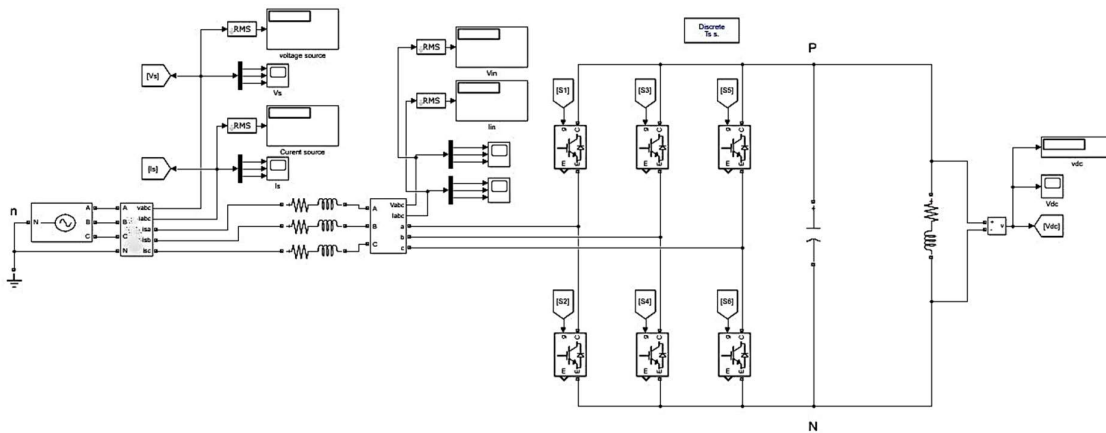
Diagram blok sistem pada Gambar 2, sumber tegangan tiga fasa (*grid*) menyuplai tegangan $v_{s(k)}$ dan arus $i_{s(k)}$ menuju AFE. Kedua Komponen tersebut kemudian ditransformasi ke dalam sumbu referensi $\alpha\text{-}\beta$ atau disebut *Clarke Transformation* untuk menjadi inputan bagi blok *predictive model*. Setelah ditransformasi, komponen referensi $v_{s(k)}$ dan $i_{s(k)}$ menjadi variabel prediksi $v_{s(k+1)}$ dan $i_{s(k+1)}$. Selanjutnya, kedua variabel prediksi tersebut dihitung daya aktif prediksi, $P_{p(k+1)}$ dan daya reaktif prediksinya, $Q_{p(k+1)}$ untuk dikomparasi dengan nilai daya aktif referensi, P_{in}^* dan daya reaktif referensi, Q_{in}^* yang sudah ditentukan sebelumnya. Tahap perhitungan nilai selisih nilai referensi dan nilai hasil prediksi dilakukan pada blok *cost function minimization* AFE, g_{afe} . Pada proses ini, kemudian dicari nilai prediksi yang paling kecil erornya sehingga nantinya diperoleh nilai yang tepat untuk pensaklaran (Sa, Sb, Sc) AFE.

Pemodelan Active Front End Converter (AFE) Tiga-Fasa Tiga-Kaki menggunakan Kendali Model Predictive Control (MPC)



Gambar 2. Blok Diagram AFE dengan Kendali MPC

Keluaran dari AFE menuju blok *DC link*. Kapasitor pada blok *DC link* digunakan untuk memperlhalus keluaran dari AFE, sekaligus sebagai penyimpan tegangan. Tegangan dc, V_{dc} dikurangi dengan tegangan dc referensi, V_{dc}^* , dan hasilnya dikalkulasi dengan PI (*proportional Integral*) untuk mendapatkan nilai daya aktif referensi, P_{dc}^* . Nilai P_{dc}^* tersebut kemudian dijumlahkan dengan nilai daya aktif referensi beban P_{load}^* , sehingga menghasilkan nilai daya aktif referensi P_{in}^* untuk diproses pada blok *cost function minimization* (g_{afe}).

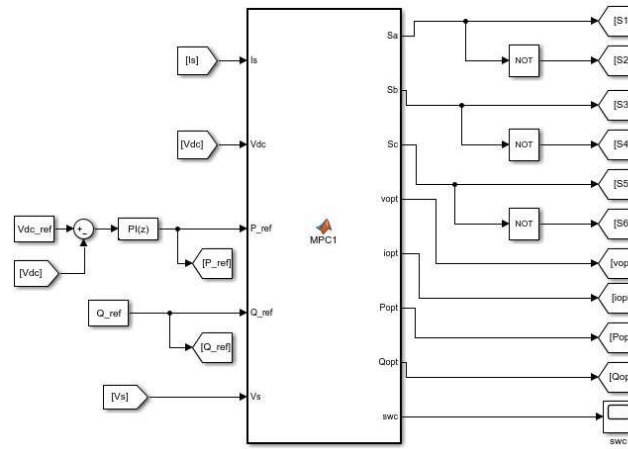


Gambar 3. Rangkaian AFE pada Simulink

Pemodelan rangkaian AFE dengan beban RL pada Simulink ditunjukkan pada Gambar 3. Bagian tegangan sumber tiga fasa diperlihatkan pada sisi paling kiri rangkaian. Selanjutnya, sebelum rangkaian utama AFE, dipasang filter pasif RL untuk menstabilkan mobilitas daya dua arah yang dihasilkan AFE maupun yang menuju AFE yang berasal dari bagian sumber. Bagian rangkaian utama AFE terdiri dari 6 komponen semikonduktor aktif (IGBT) yang berperilaku sebagai switching AFE. Sinyal pensakelaran diberikan melalui kaki IGBT bagian gate, dimana sumbernya berasal dari hasil keluaran proses kendali MPC. Daya yang mengalir ke bagian beban sebelumnya harus melalui kapasitor yang berperan sebagai DC Link sebelum menuju beban.

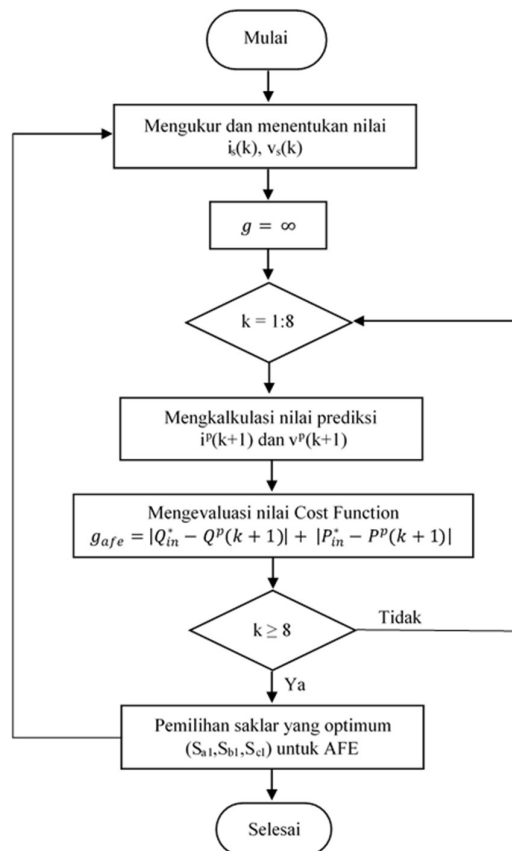
Pemodelan Active Front End Converter (AFE) Tiga-Fasa Tiga-Kaki Menggunakan Kendali Model Predictive Control (MPC)

Pengaturan sinyal yang masuk pada kaki gate IGBT mempengaruhi keluaran dari AFE. Hal ini membuat proses pengendalian rangkaian AFE menjadi bagian penting dari sistem. Proses pengendalian pensakelaran AFE kendali MPC ditunjukkan pada Gambar 4.



Gambar 4. Blok Fungsi Kendali MPC pada Simulink

Penjelasan setiap alur proses kendali MPC yang terjadi di dalam blok fungsi kendali MPC pada Gambar 4, ditunjukkan pada Gambar 5 berikut :



Gambar 5. Diagram Alir Kerja MPC pada Siste

1. Membuat program yang berisi nilai-nilai parameter sistem pada aplikasi MATLAB. Kemudian, menjalankan parameter program tersebut sehingga nilai-nilai parameter terlihat pada jendela "Workspace". Pada sisi Simulink, membuat pemodelan dengan merangkai blok fungsi yang dapat ditemukan pada *library* simulink. Setelah itu, proses kerja sistem seperti pada diagram alir algoritma MPC dibagian AFE dimulai.
2. Menentukan nilai arus $i_s(k)$, dan tegangan $v_s(k)$ yang didapat dari sistem. Nilai arus $i_s(k)$ dan $v_s(k)$ yang diperoleh dijadikan nilai *input* pada model prediksi.
3. Pada model prediksi, dilakukan proses inisialisasi nilai *infinite cost function* ($g = \infty$).
4. Kemudian, dilakukan proses iterasi pada setiap kombinasi pensakelaran $k = 1:8$ dalam satu periode *time sampling* T_s .
5. Selanjutnya, menentukan nilai daya reaktif hasil prediksi $Q^p(k + 1)$ dan daya aktif hasil prediksi $P^p(k + 1)$.
6. Setelah itu, dilakukan evaluasi nilai *cost function inverter*, g_{afe} .
7. Apabila nilai *cost function* AFE, g_{afe} terkecil berada pada rentang iterasi $k \geq 8$ maka nilai tersebut yang akan diambil sebagai nilai *input* proses pensakelaran. Jika tidak, maka akan kembali dilakukan proses iterasi ($k = 1:8$).
8. Setelah dilakukan kalkulasi dan nilai pensakelaran yang optimum (s_a, s_b, s_c) untuk AFE diperoleh, Serangkaian proses diatas dilakukan terus – menerus (*looping*) selama sistem dijalankan.

3. HASIL SIMULASI DAN ANALISIS

3.1 Hasil Simulasi dengan Beban Resistif

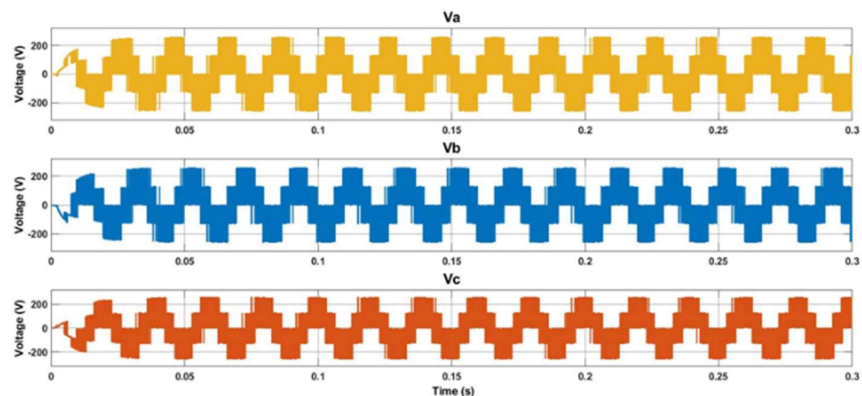
Hasil simulasi sistem dengan beban resistor sebesar 75Ω dan *time sampling* selama 0.3 detik dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Hasil Simulasi pada Beban Resistif

Pengukuran Beban Resistif		Hasil Pengukuran			
		Tegangan (rms)	Arus (rms)	THD (%)	PF
Sumber	Vsa	230.9		0.02	1
	Vsb	230.9		0.02	
	Vsc	230.9		0.02	
	I _a		6.359	0.45	
	I _b		6.359	0.45	
	I _c		6.359	0.46	
AFE	Va	149.7		91.16	1
	Vb	149.6		90.99	
	Vc	149.4		90.80	
	I _a		6.359	0.45	
	I _b		6.359	0.45	
	I _c		6.359	0.46	

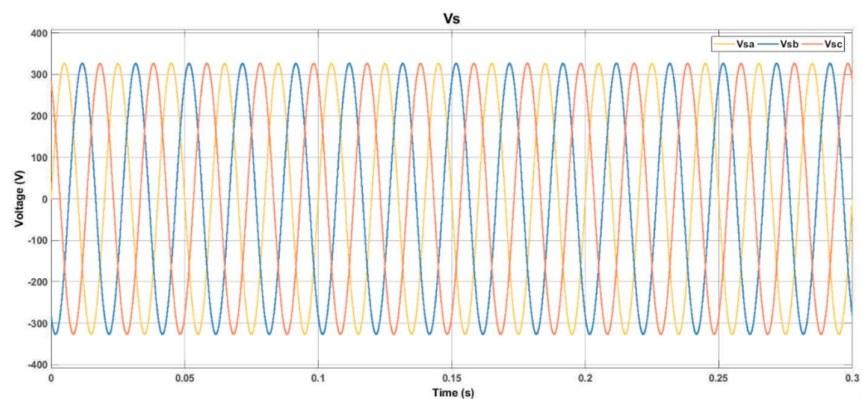
Hasil simulasi menunjukkan nilai THDv tegangan AFE dengan beban resistif rata – rata sebesar $\pm 91\%$, namun pada bagian sumber nilai THDv tegangan menjadi 0.02%, dan nilai THDi arus pada bagian AFE maupun sumber sama sebesar $\pm 0.46\%$. Bagian DC *link*, tegangan DC yang dihasilkan untuk beban resistif, V_{dc} , memiliki nilai yang terukur sebesar 384.7 V dengan nilai arus DC, I_{dc} sebesar 5.127A. Gambar tegangan AFE hasil simulasi sistem dengan beban resistif dapat dilihat pada Gambar 6, dimana gelombang tegangan tiap fasa memiliki konduksi sudut sebesar 120° .

Pemodelan Active Front End Converter (AFE) Tiga-Fasa Tiga-Kaki Menggunakan Kendali Model Predictive Control (MPC)



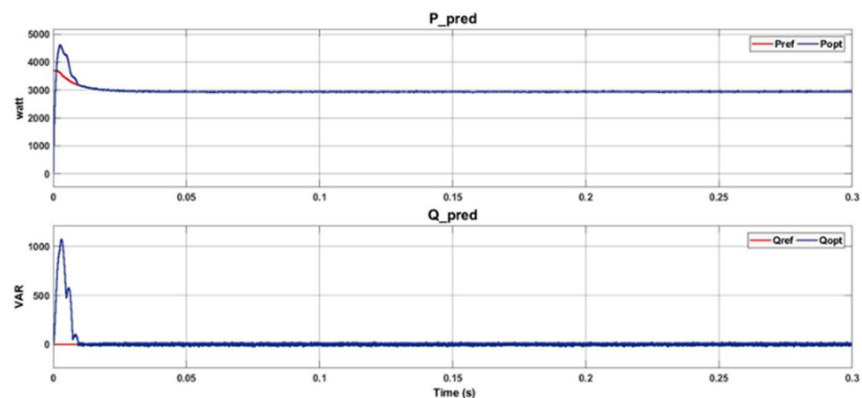
Gambar 6. Gelombang Tegangan AFE dengan Beban Resistif

Gelombang keluaran bagian sumber menjadi salah satu variabel yang dikendalikan berbentuk sinusoidal dan memiliki nilai harmonisa kecil. Hal ini dikarenakan kendali MPC berhasil mengendalikan keluaran dari pensakelaran AFE sehingga gelombang tegangan bagian sumber menjadi sinusoidal. Gelombang tegangan keluaran sumber berbentuk sinusoidal ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Gelombang Tegangan Sumber dengan Beban Resistif

Variabel lain yang yang dikendalikan pada penelitian ini adalah faktor daya pada bagian sumber. Gambar 8, memperlihatkan perbandingan hasil keluaran daya aktif prediksi P_{pred} , dan daya reaktif prediksi Q_{pred} . Grafik daya hasil prediksi (P_{pred} dan Q_{pred}) masing-masingnya terdiri dari nilai daya referensi (merah) dan nilai daya optimisasi (biru).



Gambar 8. Perbandingan Daya Referensi dan Daya Hasil Prediksi

Keluaran daya hasil prediksi, nilai error rata-rata yang dihasilkan dari selisih antara nilai daya aktif referensi, P_{ref} , dan nilai daya aktif hasil prediksi, P_{opt} , sebesar 1.357%. Sedangkan pada prediksi nilai daya reaktif, Q_{pred} , nilai rata-rata dari selisih Q_{ref} dan Q_{opt} error sebesar 26.03VA.

3.2 Hasil Simulasi dengan Beban Induktif

Parameter nilai resistor sebesar 25Ω dan nilai induktor sebesar 1H. Dibawah ini hasil simulasi sistem dengan beban induktif sesuai dengan Tabel 3.

Tabel 3. Hasil Simulasi pada Beban Induktif

Pengukuran Beban Induktif		Hasil Pengukuran			
		Tegangan (rms)	Arus (rms)	THD (%)	PF
Sumber	Vsa	230.9		0.01	0.99
	Vsb	230.9		0.01	
	Vsc	230.9		0.01	
	I _{sa}		7.354	1.92	
	I _{sb}		7.358	1.90	
	I _{sc}		7.354	1.92	
AFE	Va	101.3		43.79	
	Vb	101.2		43.86	
	Vc	101.2		43.69	
	I _a		7.354	1.92	
	I _b		7.358	1.90	
	I _c		7.354	1.92	

Tegangan yang dihasilkan AFE dengan beban induktif berbentuk pulsa, dan arus berbentuk gelombang sinusoidal. Nilai THDv tegangan AFE rata-rata sebesar $\pm 44\%$, namun pada bagian sumber nilai THDv berkurang drastis menjadi 0.01%, dan nilai THDi arus pada bagian sumber maupun AFE sama yaitu sebesar $\pm 1.92\%$. Bagian DC *link*, tegangan DC yang dihasilkan, V_{dc} , sebesar $215.8 V_{dc}$, dan arus DC, I_{dc} sebesar 5.126 A. Daya hasil prediksi, nilai error rata-rata yang dihasilkan dari selisih antara nilai daya aktif referensi, P_{ref} , dan nilai daya aktif hasil prediksi, P_{opt} , adalah sebesar 4.172%. Sedangkan pada prediksi nilai daya reaktif, Q_{pred} , nilai rata-rata dari selisih Q_{ref} dan Q_{opt} error sebesar 95.29VA.

3.3 Hasil Simulasi dengan Beban Kapasitif

Simulasi dengan beban kapasitif dengan resistor 25Ω , dan kapasitor 1F terdapat pada tabel 4.

Tabel 4. Hasil Simulasi pada Beban Kapasitif

Pengukuran Beban Kapasitif		Hasil Pengukuran			
		Tegangan (rms)	Arus (rms)	THD (%)	PF
Sumber	Vsa	230.9		0.01	0.99
	Vsb	230.9		0.01	
	Vsc	230.9		0.01	
	I _{sa}		7.337	1.91	
	I _{sb}		7.333	1.93	
	I _{sc}		7.333	1.90	
AFE	Va	101.9		43.64	
	Vb	101.9		43.72	
	Vc	102		43.75	
	I _a		7.337	1.91	
	I _b		7.333	1.93	
	I _c		7.333	1.90	

Hasil simulasi beban kapasitif, nilai rms tegangan AFE $\pm 101V$, dan nilai rms tegangan sumber sebesar 230.9V. Nilai rms arus AFE maupun arus sumber sama yaitu sebesar $\pm 7.3A$ sehingga nilai THDi keduanya pun sama sebesar $\pm 1.9\%$. Nilai THDv tegangan AFE yang terukur sebesar $\pm 43.75\%$, dan THDv tegangan sumber menurun menjadi 0.01%. Tegangan DC pada DC *link*, V_{dc} , sebesar 217.4V, dan arus DC, I_{dc} , sebesar 8.595A. Daya hasil prediksi, nilai error rata – rata yang dihasilkan dari selisih antara nilai daya aktif referensi, P_{ref} , dan nilai daya aktif hasil prediksi, P_{opt} , adalah sebesar 4.675%. Sedangkan pada prediksi nilai daya reaktif, Q_{pred} , nilai rata –rata dari selisih Q_{ref} dan Q_{opt} *error* sebesar 108.5VA.

3.4 Hasil Simulasi dengan Beban Nonlinear

Simulasi dengan beban nonlinear dilakukan dengan memasang inverter pada bagian keluaran DC *link*. Inverter diberi beban RL ($R = 25\Omega$ dan $L = 1H$), dan hasil simulasinya terdapat pada tabel 5.

Tabel 5. Hasil Simulasi pada Beban Nonlinear

Pengukuran Beban Nonlinear		Hasil Pengukuran				
		Tegangan (rms)	Arus (rms)	THD (%)	PF	
Sumber	Vsa	230.9		0.03	0.819	
	Vsb	230.9		0.03		
	Vsc	230.9		0.03		
	I _{sa}			6.655		1.22
	I _{sb}			6.656		1.23
	I _{sc}			6.662		1.26
AFE	Va		211.8			121.65
	Vb		212.7			120.96
	Vc		213			120.83
	I _a		6.655			1.22
	I _b		6.656			1.23
	I _c		6.662			1.26

Hasil simulasi menunjukkan bila nilai rms tegangan AFE sebesar $\pm 213V$, dan rms tegangan sumber sebesar 230.9V. Nilai arus rms AFE dan arus sumber sama yaitu sebesar $\pm 6.6A$ dengan nilai THDi sama pada kedua bagian tersebut yaitu sebesar $\pm 1.2\%$. Nilai THDv tegangan AFE sebesar $\pm 121\%$, namun nilai THDv menurun signifikan pada bagian sumber dan bernilai 0.03%. Tegangan DC pada bagian DC *link*, V_{dc} , sebesar 588Vdc, dan arus DC, I_{dc} , sebesar 0.01764A. Daya hasil prediksi, nilai eror rata – rata yang dihasilkan dari selisih antara nilai daya aktif referensi, P_{ref} , dan nilai daya aktif hasil prediksi, P_{opt} , adalah sebesar 1.697%. Sedangkan pada prediksi nilai daya reaktif, Q_{pred} , nilai rata –rata dari selisih Q_{ref} dan Q_{opt} *error* sebesar 27.28VA.

3.5 Hasil Simulasi VFD dengan Beban Motor Induksi

Motor induksi tiga-fasa jenis asinkron yang dipasang pada sistem mempunyai parameter seperti pada Tabel 6, dan nilai- nilai hasil simulasi sistem terdapat pada Tabel 7. Hasil Simulasi beban kapasitif, nilai rms tegangan AFE $\pm 235V$, dan nilai rms tegangan sumber sebesar 230.9V. Nilai rms arus AFE maupun arus sumber sama yaitu sebesar $\pm 4.7A$ sehingga nilai THDi keduanya pun sama sebesar $\pm 1.18\%$. Nilai THDv tegangan AFE yang terukur sebesar $\pm 136\%$ dan THDv tegangan sumber 0.04%. Daya hasil prediksi, nilai error rata – rata yang dihasilkan dari selisih antara nilai daya aktif referensi, P_{ref} , dan nilai daya aktif hasil prediksi, P_{opt} , adalah sebesar 2.785%. Sedangkan pada prediksi nilai daya reaktif, Q_{pred} , nilai rata –rata dari selisih Q_{ref} dan Q_{opt} *error* sebesar 57.36VA.

Tabel 6. Parameter Motor Induksi

Parameter	Nilai	Satuan
P	18500	W
Hp	73	hp
Vrms	380	V
f	50	Hz
Tm	12	N.m
Rs	0,6	Ohm
Ls	35	uH
Rr	0.8	Ohm
Lr	6	mH

Tabel 7. Hasil Simulasi VFD

Pengukuran Motor Induksi pada VFD		Hasil Pengukuran			
		Tegangan (rms)	Arus (rms)	THD (%)	PF
Sumber	Vsa	230.9		0.04	0.99
	Vsb	230.9		0.04	
	Vsc	230.9		0.04	
	Isa		4.771	1.18	
	Isb		4.769	1.17	
	Isc		4.768	1.18	
AFE	Va	235.8		136.64	
	Vb	233.8		135.28	
	Vc	235.5		136.95	
	Ia		4.771	1.18	
	Ib		4.769	1.17	
	Ic		4.768	1.18	

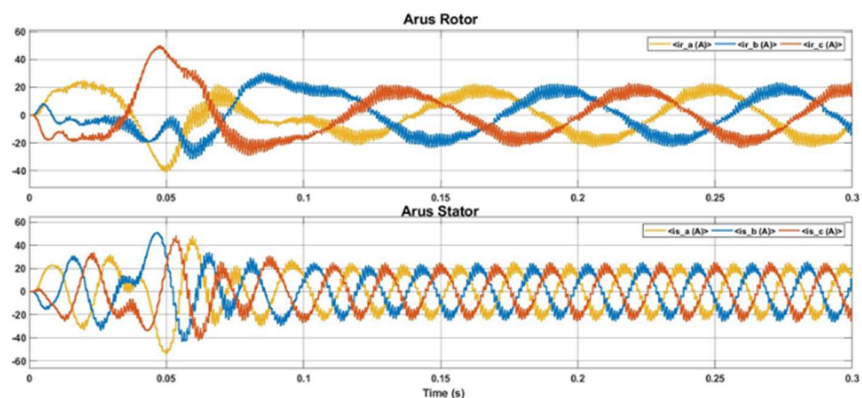
Simulasi pada sisi motor dilakukan untuk mengetahui karakteristik motor dan melihat respon motor pada saat berjalan. Pengukuran meliputi kecepatan motor, arus pada rotor dan stator serta torsi motor. Waktu simulasi selama 0.3 detik dengan *time sampling* 10 μ s. Motor induksi yang digunakan diberi nilai torsi sebesar 6 Nm. Nilai hasil Simulasi dapat dilihat pada Tabel 8, sedangkan gelombang hasil simulasi AFE pada VFD dengan beban motor induksi dapat dilihat pada Gambar 9 dan Gambar 10.

Tabel 8. Hasil Simulasi Motor Induksi pada VFD

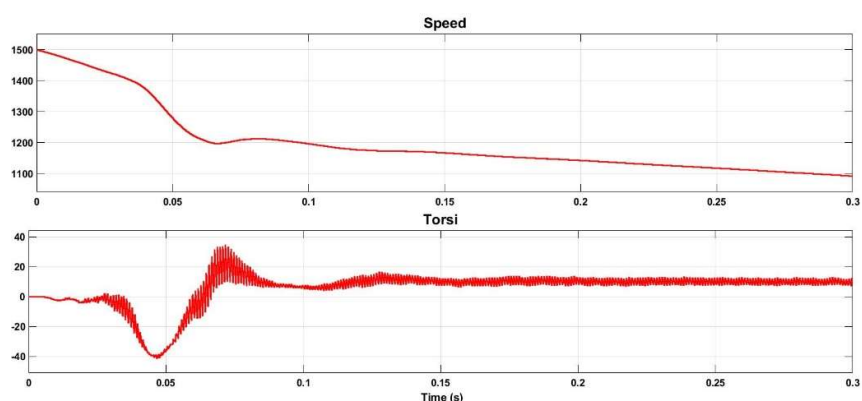
Subyek Pengukuran	Simbol	Nilai Terukur	Satuan
Kecepatan motor	ω	1092	rpm
Torsi Keluaran	Te	9.97	Nm
Arus Rotor	ir_a	-8.275	ampere
	ir_b	-10.54	
	ir_c	18.81	
Arus Stator	is_a	12.39	
	is_b	8.731	
	is_c	-21.13	

Arus pada bagian rotor mengalami kondisi stabil (*transien*) terjadi setelah detik ke 0.11. Sedangkan pada bagian stator, kondisi transien didapatkan setelah sekitar detik ke 0.07. Kedua grafik arus pada Gambar 9, menunjukkan bentuk gelombang sinusoidal namun memiliki kerapatan frekuensi yang berbeda.

Pemodelan Active Front End Converter (AFE) Tiga-Fasa Tiga-Kaki Menggunakan Kendali Model Predictive Control (MPC)



Gambar 9. Arus Rotor dan Arus Stator



Gambar 10. Gelombang Keluaran Kecepatan dan Torsi

Gambar 10 menunjukkan gelombang keluaran kecepatan dan torsi yang dihasilkan. Kecepatan motor induksi cenderung mengalami penurunan selama proses pengujian, namun berbeda dengan torsi motor induksi yang mengalami kondisi transien pada detik 0.09 dan stabil pada nilai torsi sebesar 17 Nm.

4. KESIMPULAN

Simulasi pemodelan konverter *Active Front End* (AFE) menggunakan kendali *Model Predictive Control* (MPC) menghasilkan nilai peningkatan pada kualitas daya listrik, khususnya pada bagian sumber. Hasil Simulasi yang telah dilakukan ketika sistem dipasang beban resistif menunjukkan nilai THDv tegangan AFE rata – rata sebesar $\pm 91\%$. Penurunan yang signifikan terjadi pada bagian sumber dengan nilai THDv tegangan sebesar 0.02% , dan nilai THDi arus pada bagian AFE maupun sumber sama sebesar $\pm 0.46\%$. Ketika beban induktif, pada bagian AFE THDv sebesar $\pm 44\%$, pada bagian sumber nilai THDv berkurang drastis menjadi 0.01% , dan nilai THDi arus baik pada sumber maupun AFE sama yaitu sebesar $\pm 1.92\%$. Ketika beban kapasitif, Nilai THDv tegangan AFE terukur sebesar $\pm 43.75\%$, THDv tegangan sumber menurun menjadi 0.01% , dan nilai THDi keduanya pun sama sebesar $\pm 1.9\%$. Ketika beban nonlinear, Nilai THDv tegangan AFE sebesar $\pm 121\%$, THDv menurun signifikan pada bagian sumber hingga sebesar 0.03% , dan nilai THDi sama pada kedua bagian tersebut yaitu sebesar $\pm 1.2\%$. Simulasi VFD, didapatkan nilai THDv tegangan AFE terukur sebesar $\pm 136\%$, THDv tegangan sumber menurun menjadi 0.04% , dan nilai THDi keduanya pun sama sebesar $\pm 1.18\%$. Semua hasil Simulasi yang telah disebutkan memiliki hasil faktor daya keluaran rata-

rata 0.9 hingga 1 (*unity*). Hal ini menunjukkan bila sistem bekerja dengan sangat baik mengurangi nilai harmonisa, dan meningkatkan kualitas daya pada bagian sumber sistem.

DAFTAR RUJUKAN

- Andang, A., Hartati, R. S., Manuaba, I. B. G., & Kumara, I. N. S. (2022). Grid-Connected Inverter using Model Predictive Control to Reduce Harmonics in Three-Phase Four-Wires Distribution System. *Engineering Letters*, *30*(1), 108–116.
- Antoniewicz, K., & Rafal, K. (2017). Model predictive current control method for four-leg three-level converter operating as shunt active power filter and grid connected inverter. *Bulletin of the Polish Academy of Sciences Technical Sciences*, *65*(5), 601–607. <https://doi.org/10.1515/bpasts-2017-0065>
- Blaabjerg, F. (2018). Control of power electronic converters and systems. In *Control of Power Electronic Converters and Systems*. <https://doi.org/10.1016/C2015-0-02427-3>
- Chimonyo, K. B., Sathish Kumar, K., Kishore Kumar, B., & Ravi, K. (2018). Design and Analysis of Electrical Drives Using Active Front End Converter. *2018 Second International Conference on Inventive Communication and Computational Technologies (ICICCT)*, *Icicct*, (pp.115–119). <https://doi.org/10.1109/ICICCT.2018.8473042>
- Cortés, P., Rodríguez, J., Antoniewicz, P., & Kazmierkowski, M. (2008). Direct power control of an AFE using predictive control. *IEEE Transactions on Power Electronics*, *23*(5), 2516–2523. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2008.2002065>
- Davari, P., Zare, F., & Abdelhakim, A. (2018). Active rectifiers and their control. In *Control of Power Electronic Converters and Systems: Volume 2* (pp. 3–52). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-816136-4.00013-0>
- Dehghanzadeh, A., Farahani, G., Vahedi, H., & Al-Haddad, K. (2018). Model predictive control design for DC-DC converters applied to a photovoltaic system. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, *103*, 537–544. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2018.05.004>
- Islam, M. M. (2019). Overview – VFD Motor Controller. In *VFD Challenges for Shipboard Electrical Power System Design* (pp. 1–19). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119463474.ch1>
- Karamanakos, P., Geyer, T., Oikonomou, N., Kieferndorf, F., & Manias, S. (2013). Model predictive control in power electronics: Strategies to reduce the computational complexity. *IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, Mv*, (pp.5818–5823). <https://doi.org/10.1109/IECON.2013.6700088>
- Lee, J. H. (2011). Model predictive control: Review of the three decades of development.

- International Journal of Control, Automation and Systems*, 9(3), 415–424.
<https://doi.org/10.1007/s12555-011-0300-6>
- Mohamed, I. S., Rovetta, S., Do, T. D., Dragicevic, T., & Diab, A. A. Z. (2019). A Neural-Network-Based Model Predictive Control of Three-Phase Inverter With an Output LC Filter. *IEEE Access*, 7, 124737–124749.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2938220>
- Qiu, H., Zhao, X., Wei, Y., Tang, B., Yi, R., Cui, G., & Yang, C. (2020). Comparative analysis of super high-speed permanent magnet generator electromagnetic and temperature fields with the PWM and uncontrolled rectifiers. *EPE Journal*, 30(4), 181–191.
<https://doi.org/10.1080/09398368.2020.1776494>
- Rashid, Muhammad H. (2014). *Power electronics: devices, circuits and applications*.
- Revuelta, P. S., Litrán, S. P., & Thomas, J. P. (2015). Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality. In *Active Power Line Conditioners: Design, Simulation and Implementation for Improving Power Quality*.
<https://doi.org/10.1016/C2014-0-02915-2>
- Singh, B., Gairola, S., Singh, B. N., Chandra, A., & Al-Haddad, K. (2008). Multipulse ac-dc converters for improving power quality: A review. In *IEEE Transactions on Power Electronics* (Vol. 23, Issue 1, pp. 260–281). <https://doi.org/10.1109/TPEL.2007.911880>
- Song, Z., Tian, Y., Chen, W., Zou, Z., & Chen, Z. (2016). Predictive Duty Cycle Control of Three-Phase Active-Front-End Rectifiers. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 31(1), 698–710. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2015.2398872>
- Vazquez, S., Rodriguez, J., Rivera, M., Franquelo, L. G., & Norambuena, M. (2017). Model Predictive Control for Power Converters and Drives: Advances and Trends. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 64(2), 935–947.
<https://doi.org/10.1109/TIE.2016.2625238>
- Zhou, Z., Zhang, L., Liu, Z., Chen, Q., Long, R., & Su, H. (2020). Model Predictive Control for the Receiving-Side DC–DC Converter of Dynamic Wireless Power Transfer. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 35(9), 8985–8997.
<https://doi.org/10.1109/TPEL.2020.2969996>