

# Transformasi Tegangan Tiga Fasa Asimetris untuk DC-Link Voltage Control Menggunakan Kompensator LPF dan Perbandingan Unjuk Kerjanya dengan Kompensator PID

Yusak Tanoto, Felix Pasila

Jurusan Teknik Elektro, Universitas Kristen Petra Surabaya 60236, e-mail: tanyusak@petra.ac.id

**Abstrak:**-Makalah ini memaparkan penggunaan Kompensator untuk menghasilkan tegangan DC yang berasal dari sumber tegangan AC tiga fasa Asimetris yang ditimbulkan dari sistem pembangkit listrik tenaga angin. Jenis kompensator yang dipilih adalah Low Pass Filter (LPF) dan Proporsional-Integral-Differential (PID). Tegangan DC yang dihasilkan kemudian dapat menjadi suplai bagi peralatan Konverter. Tujuan utama dari penelitian ini adalah mendapatkan unjuk kerja Kompensator terbaik diantara kedua jenis kompensator yang digunakan. Dari simulasi didapatkan kompensator jenis LPF mempunyai unjuk kerja lebih baik dibanding jenis PID dalam hal maximum overshoot, tegangan DC yang dihasilkan, kecepatan komputasi, dan penentuan parameter.

**Kata Kunci:** Tegangan AC Asimetris, Transformasi, Kompensator

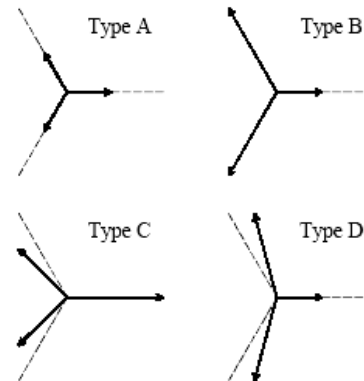
## 1. PENDAHULUAN

Salah satu pengaruh suplai tegangan tiga fasa asimetris pada rangkaian konverter adalah timbulnya amplitudo tegangan yang tidak konstan pada rangkaian konverter tersebut. Suplai tegangan asimetris dapat terjadi bila salah satu fasa mempunyai amplitudo berbeda dibanding dengan amplitudo pada fasa lainnya. Suplai Tegangan asimetris lebih lanjut dapat mempengaruhi kinerja *Frequency Converter*. Sebuah *Frequency Converter* memerlukan tegangan DC yang konstan, misalnya untuk menyuplai rangkaian *speed-drive converter*.

## 2. TEGANGAN TIGA FASA ASIMETRIS: JENIS DAN TRANSFORMASINYA

### 2.1 Jenis Tegangan Tiga Fasa Asimetris

Tegangan tiga fasa asimetris dapat diklasifikasikan menjadi empat jenis [1] yaitu A, B, C, D yang digambarkan sebagai diagram fasor tegangannya (*voltage phasor*) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1. Garis putus-putus menunjukkan *pre-fault voltage phasors* sedangkan garis tidak terputus menunjukkan *fault voltage phasors*.



Gambar 1. Jenis-jenis Tegangan Tiga Fasa Asimetris

Seperti terlihat pada gambar diatas, jenis A merupakan balanced phasor / jenis fasa seimbang dimana semua fasor drop dengan *magnitude* yang sama. Umumnya jenis B yang dipakai sebagai model tegangan asimetris, dimana hanya satu fasor yang *magnitudenya* drop. Jenis C dan D juga dapat terjadi, dimana bukan hanya *magnitude* yang drop pada satu atau dua fasa tetapi dimungkinkan juga sudut fasanya mengalami pergeseran sehingga menjadi lebih besar atau lebih kecil dari  $120^\circ$  terhadap fasor/fasa lain. Besar *magnitude* dapat didefinisikan dengan angka 1, sehingga bila  $h$  adalah nilai tengah antara 0 hingga 1, maka dapat ditulis  $0 \leq h \leq 1$ .

Dalam bentuk fasor dapat ditulis sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \underline{V}_a &= hV \\ \underline{V}_b &= -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV \\ \underline{V}_c &= -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV \end{aligned} \quad (1)$$

Untuk jenis B, C, dan D dapat dinyatakan dalam persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \underline{V}_a &= hV \\ \underline{V}_b &= -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ \underline{V}_c &= -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{aligned} \quad (2)$$

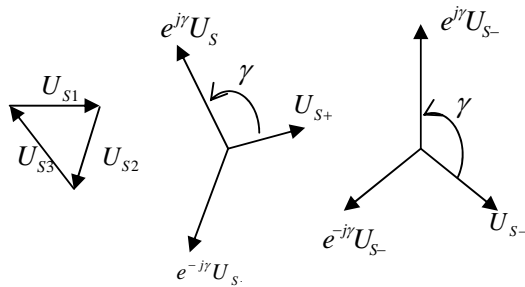
$$\begin{aligned} \underline{V}_a &= V \\ \underline{V}_b &= -\frac{1}{2}V - j\frac{\sqrt{3}}{2}hV \\ \underline{V}_c &= -\frac{1}{2}V + j\frac{\sqrt{3}}{2}hV \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \underline{V}_a &= V \\ \underline{V}_b &= -\frac{1}{2}hV - j\frac{\sqrt{3}}{2}V \\ \underline{V}_c &= -\frac{1}{2}hV + j\frac{\sqrt{3}}{2}V \end{aligned} \quad (4)$$

## 2.2 Transformasi Tegangan Tiga Fasa Asimetris Menjadi Tegangan Tiga Fasa Simetris

Transformasi Asimetris menjadi Simetris dapat dilakukan dengan cara dekomposisi komponen asimetrisnya menjadi simetris maupun transformasi model *abc to dq*, dan model *dq to abc*. Contoh dekomposisi ini terdapat pada Gambar 2, dimana terdapat sebuah diagram fasor yang sinusoidal namun tegangan fasa-netralnya asimetris. Karena penghantar netral pada lilitan statornya terisolasi dan simetris, maka penjumlahan tegangan fasa sesaatnya tetap nol, dimana diagram fasornya membentuk sebuah segitiga tertutup sesuai dengan persamaan berikut ini [2]:

$$\underline{U}_{s1} + \underline{U}_{s2} + \underline{U}_{s3} = 0 \quad (7)$$



Gambar 2. Dekomposisi Komponen Tiga Fasa Asimetris Menjadi Komponen Simetris

Sistem tiga fasa asimetris dapat didekomposisi menjadi komponen simetris berdasarkan persamaan berikut ini:

$$\begin{aligned} \underline{U}_{s1} &= \underline{U}_{s+} + \underline{U}_{s-} + \underline{U}_0, \\ \underline{U}_{s2} &= e^{-j\gamma} \underline{U}_{s+} + e^{j\gamma} \underline{U}_{s-} + \underline{U}_0, \quad \gamma = \frac{2\pi}{3} \\ \underline{U}_{s3} &= e^{j\gamma} \underline{U}_{s+} + e^{-j\gamma} \underline{U}_{s-} + \underline{U}_0, \end{aligned} \quad (8)$$

Dimana  $\underline{U}_{s+}$  adalah komponen positif,  $\underline{U}_{s-}$  adalah komponen negatif, dan  $\underline{U}_0$  adalah komponen tegangan *zero-sequence* per fasa. Komponen simetris  $\underline{U}_{s+}$  dan  $\underline{U}_{s-}$  membentuk dua sistem tiga fasa yang simetris pada *opposite phase sequencenya* seperti pada persamaan 9 berikut ini.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{s+} &= \frac{1}{3} [\underline{U}_{s1} + e^{j\gamma} \underline{U}_{s2} + e^{-j\gamma} \underline{U}_{s3}] \\ \underline{U}_{s-} &= \frac{1}{3} [\underline{U}_{s1} + e^{-j\gamma} \underline{U}_{s2} + e^{j\gamma} \underline{U}_{s3}] \\ \underline{U}_0 &= \frac{1}{3} [\underline{U}_{s1} + \underline{U}_{s2} + \underline{U}_{s3}] = 0. \end{aligned} \quad (9)$$

Dapat dituliskan juga tegangan *line to line* seperti pada persamaan berikut ini.

$$\begin{aligned} \underline{U}_{s+} &= \frac{1}{3} [\underline{U}_{s1} - \underline{U}_{s2} - e^{-j\gamma} (\underline{U}_{s2} - \underline{U}_{s3}) + \underline{U}_{s2} (1 + e^{j\gamma} + e^{-j\gamma})] \\ &= \frac{1}{3} [\underline{U}_{12} - e^{-j\gamma} \underline{U}_{23}] \end{aligned} \quad (10)$$

Demikian juga untuk nilai  $\underline{U}_{s-}$  seperti pada persamaan berikut ini.

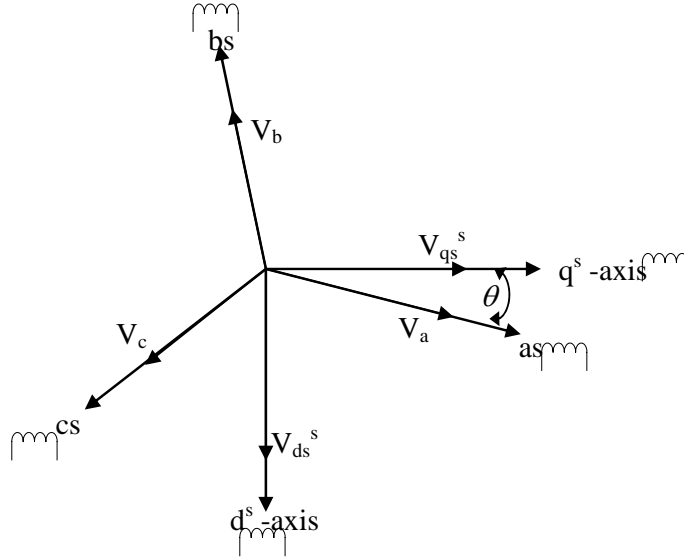
$$\underline{U}_{s-} = \frac{1}{3} [\underline{U}_{12} - e^{j\gamma} \underline{U}_{23}] \quad (11)$$

Untuk menentukan komponen positif dan negative sequence dapat diperoleh dari dua tegangan *line to line* karena:

$$\underline{U}_{12} + \underline{U}_{23} + \underline{U}_{31} = 0 \quad (12)$$

Dalam mendesain model transformasi *abc to dq* maupun sebaliknya di simulink diperlukan pemahaman mengenai prinsip *vector control*. Prinsip *vector control* yang digunakan adalah *dynamic d-q model*. Gambar berikut ini menjelaskan diagram vector sebuah mesin induksi tiga fasa dengan axis stasioner *abc* pada sudut  $2\pi/3$ . Transformasi yang dilakukan adalah dari tegangan tiga fasa *line to line* / variabel *stationary reference frame (a-b-c)* menjadi variabel dua fasa *constant-stationary reference frame (d-q)*, yang bergantung pada  $\theta$ . Kemudian transformasi selanjutnya adalah kedalam bentuk *synchronously*

rotating reference frame ( $d^e-q^e$ ), demikian pula sebaliknya [3].



Gambar 2. Transformasi Axis Stasioner frame  $a-b-c$  to  $ds-q_s$

Bila axis  $d^s - q^s$  mempunyai sudut  $\theta$ , maka tegangan  $V_{ds}^s$  dan  $V_{qs}^s$  dapat ditentukan menjadi komponen  $as-bs-cs$  dan dapat direpresentasikan dalam bentuk sebagai berikut [4]:

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 1 \\ \cos(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta - 120^\circ) & 1 \\ \cos(\theta + 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{os}^s \end{bmatrix} \quad (13)$$

Matriks *Corresponding inversenya* adalah

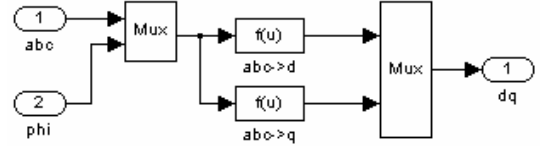
$$\begin{bmatrix} V_{qs}^s \\ V_{ds}^s \\ V_{os}^s \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 120^\circ) & \cos(\theta + 120^\circ) \\ \sin \theta & \sin(\theta - 120^\circ) & \sin(\theta + 120^\circ) \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} \quad (14)$$

Dimana  $V_{os}^s$  ditambahkan sebagai komponen *zero sequence* yang dapat tidak dimunculkan.

### 3. PEMODELAN SUPLAI TEGANGAN ASIMETRIS UNTUK MEMPEROLEH TEGANGAN DC

Melalui simulink kita dapat membuat pemodelan  $abc$  to  $dq$  atau  $dq$  to  $abc$  sebagai berikut:

Pemodelan  $abc$  to  $dq$ :

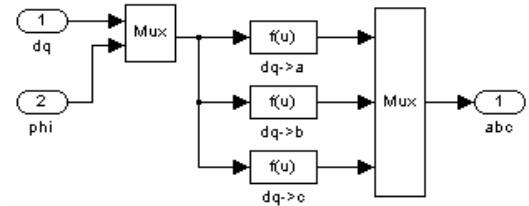


Gambar 3. Pemodelan  $abc$  to  $dq$

Dimana:

$$\begin{aligned} abc \text{ to } d &= \frac{2}{3} * (u[1] * \cos(u[4]) + u[2] * \cos(u[4] - 2 * \pi / 3) + u[3] * \cos(u[4] + 2 * \pi / 3)) \\ abc \text{ to } q &= \frac{2}{3} * (-u[1] * \sin(u[4]) - u[2] * \sin(u[4] - 2 * \pi / 3) - u[3] * \sin(u[4] + 2 * \pi / 3)) \end{aligned}$$

Pemodelan  $dq$  to  $abc$ :

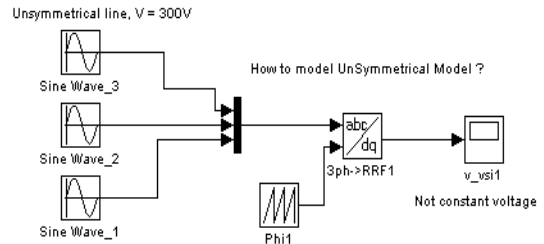


Gambar 4. Pemodelan  $dq$  to  $abc$

Dimana:

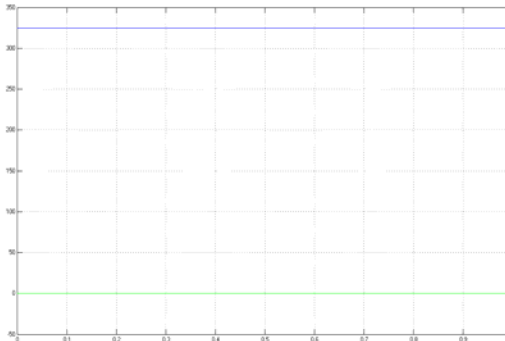
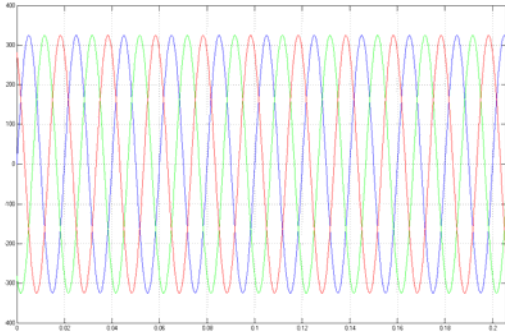
$$\begin{aligned} dq \text{ to } a &= u[1] * \cos(u[3]) - u[2] * \sin(u[3]) \\ dq \text{ to } b &= u[1] * \cos(u[3] - 2 * \pi / 3) - u[2] * \sin(u[3] - 2 * \pi / 3) \\ dq \text{ to } c &= u[1] * \cos(u[3] + 2 * \pi / 3) - u[2] * \sin(u[3] + 2 * \pi / 3) \end{aligned}$$

Pemodelan suplai tegangan tiga fasa asimetris terlihat seperti pada Gambar 5, dimana salah satu amplitudo tegangan lebih kecil dibanding yang lain. Gambar 5 juga merupakan pemodelan cara mendapatkan tegangan DC menggunakan model  $abc$  to  $dq$ , dimana tegangan DC yang dihasilkan bergantung pada suplai tiga fasa.



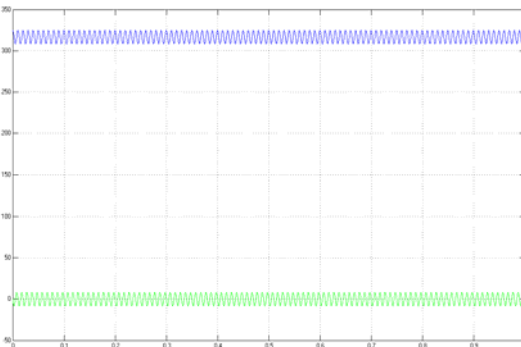
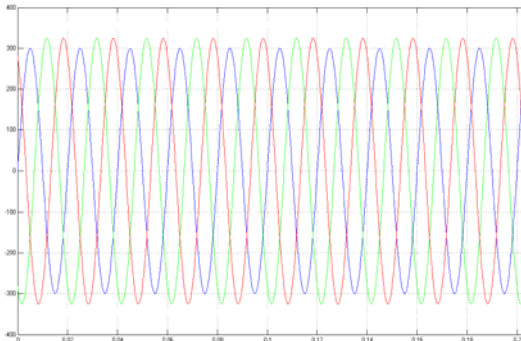
Gambar 5. Pemodelan Tegangan DC dari Suplai Tiga Fasa Asimetris

Untuk kondisi tegangan simetris (setiap *line* 325 Volt), akan didapatkan tegangan DC konstan seperti pada Gambar 6 (a) dan (b) berikut ini.



Gambar 6 (a) dan (b). Tegangan DC Link yang Simetris

Bila salah satu line menyuplai tegangan yang lebih kecil (300 Volt) maka suplai tiga fasa tersebut menjadi suplai yang asimetris, seperti yang terdapat pada Gambar 7 (a) dan (b) berikut ini:



Gambar 7. (a) dan (b) Tegangan DC Link yang Asimetris

Pada Gambar 7 tegangan DC berfluktuasi dari 308V hingga 325V pada frekuensi 100 Hz. Jika tegangan ini diaplikasikan pada sebuah konverter, hal ini berarti konverter memerlukan sebuah sistem kompensasi untuk mencegah fluktuasi tegangan DC.

#### 4. DESAIN MODEL KOMPENSATOR

Pada makalah ini model kompensator yang digunakan adalah *Low Pass Filter* (LPF) dan akan dilihat perbandingan unjuk kerjanya dengan jenis kompensator *Proportional-Integral-Differential* (PID) untuk mengkompensasi tegangan asimetris jenis / tipe B. Persamaan yang digunakan untuk kedua jenis kompensator ini berturut-turut sesuai dengan persamaan berikut ini:

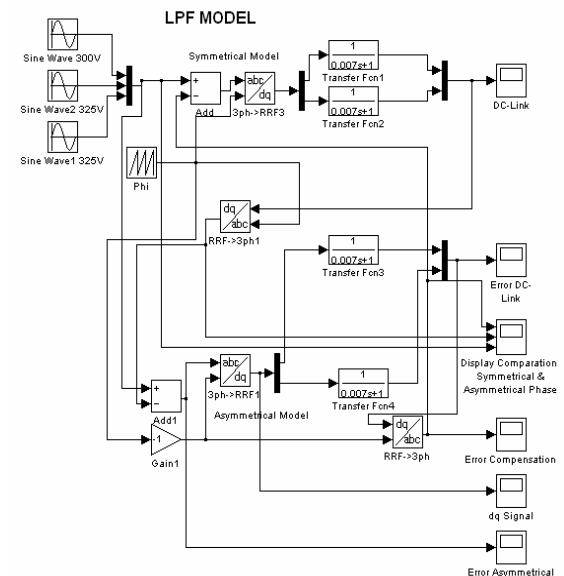
$$LPF = \frac{1}{T_s \cdot s + 1} \quad (15)$$

Dengan  $T_s = 0.007$

$$PID = P + \frac{I}{s} + Ds, \quad (16)$$

Dengan  $P = 0.999$ ,  $I = 0.0007$ ,  $D = 0.2161$

Penggunaan sistem kompensator LPF ini bertujuan untuk mengkompensasi ripple pada Tegangan DC-Link (*upper and lower*) menggunakan LPF setelah blok abc/dq seperti pada Gambar 8 berikut ini.

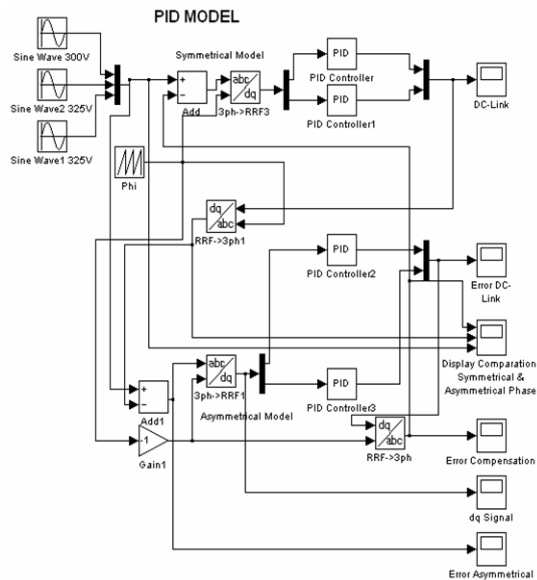


Gambar 8. Pemodelan Sistem Menggunakan Kompensator LPF

Gambar 8 diatas menunjukkan sinyal sinusoidal tiga fasa, dimana salah satu sinyal memiliki magnitude yang lebih kecil dibanding yang lain.

Prinsip model tidak lain, memisahkan bagian yang asimetris dari sistem dengan bagian simetrisnya. Kedua model tersebut dibawa ke  $dq$  model untuk difilter dengan kompensator yang identik, pada gambar 8 berupa LPF orde satu dan pada gambar 9 berupa kompensator PID. Hasil keluaran dari asimetris  $dq$  model di-feedback-kan ke bagian input model simetris. Di sisi lain, hasil output dari bagian model simetris juga diumpun-balikkan ke bagian input asimetris. Proses ini menyebabkan terjadi loop dengan tujuan secara bertahap menghilangkan bagian asimetris dari model simetris sampai waktu simulasi berakhir. Hal yang sama juga dilakukan untuk kompensator PID pada gambar 9. Model pada gambar 8 dan 9 akan menghasilkan output DC-link yang sudah dikompensasi (bagian asimetris sudah tidak ada), Error DC-link, Error asimetris model dan dapat juga dilihat komparasi antara model asimetris dan simetris.

Pemodelan sistem dengan Kompensator PID seperti terlihat pada Gambar 9 berikut ini.

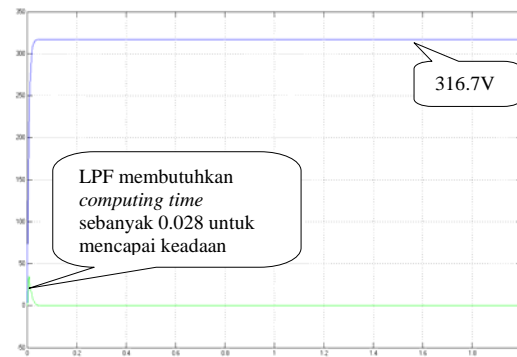


Gambar 9. Pemodelan Sistem Menggunakan Kompensator LPF

## 4. SIMULASI DAN ANALISA SISTEM

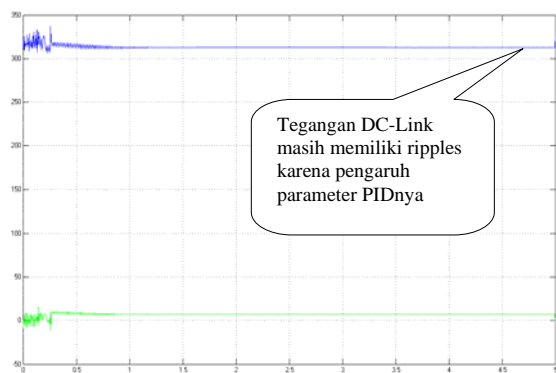
### 4.1 Simulasi dan Hasilnya

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan untuk kedua jenis kompensator didapatkan hasil respon seperti pada Gambar 10 dan Gambar 11 berikut ini.



Gambar 10. Respon Kompensator LPF

Dari gambar diatas terlihat bahwa pemodelan dengan *Low Pass Filter* didapatkan nilai tegangan *DC-Link* yang konstan sebesar 316.7 V, dimana *computing time* yang dibutuhkan adalah 0.028s untuk mencapai keadaan *steady state*.

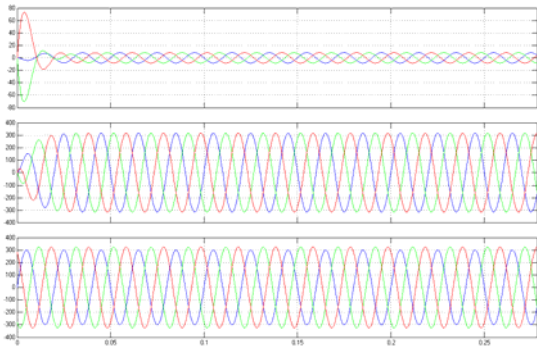


Gambar 11. Respon Kompensator PID

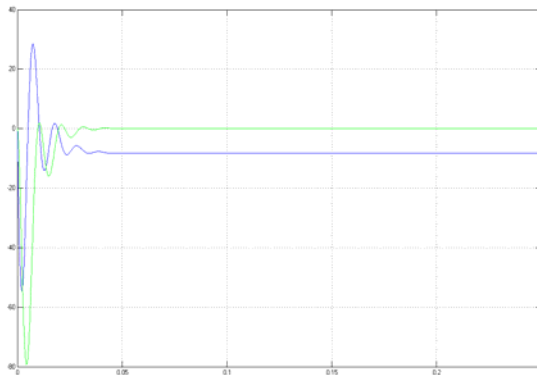
Dari Gambar 11 terlihat bahwa pemodelan dengan *PID* didapatkan nilai tegangan *DC-Link* yang sebesar 316.7 V namun masih mengandung ripples, sedangkan *computing time* yang dibutuhkan lebih cepat dibanding pemodelan dengan kompensator LPF untuk mencapai keadaan *steady state*.

### 4.2 Analisa Kesalahan (*Error Analysis*)

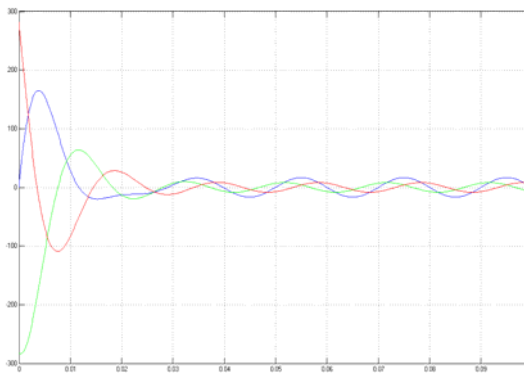
Berdasarkan Analisa Error yang dilakukan untuk kompensator LPF didapatkan hasil seperti pada Gambar 12. Terdapat tiga respon gelombang yang berturut-turut (dari atas ke bawah) menunjukkan Kesalahan komponen asimetris (*Error-Asymmetrical Components*), Komponen simetris yang terbentuk setelah waktu komputasi 0.028 (*Symmetrical components after 0.028 computing time*), dan Nilai tegangan asimetris line to line (*Asymmetrical line-to-line*).



Gambar 12. Respon Kesalahan Komponen Asimetris dan Komponen Simetris pada Kompensator LPF



Gambar 13. Respon Kesalahan Komponen dq pada Kompensator LPF

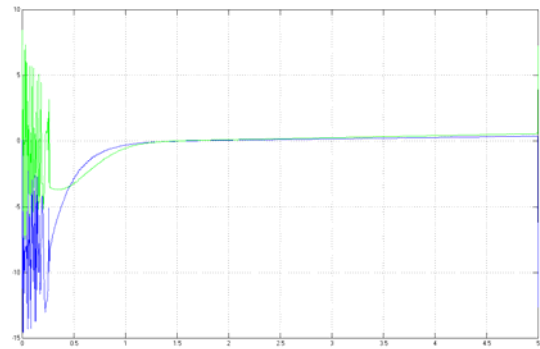


Gambar 14. Respon Kesalahan Kompensasi Komponen Simetris pada Kompensator LPF

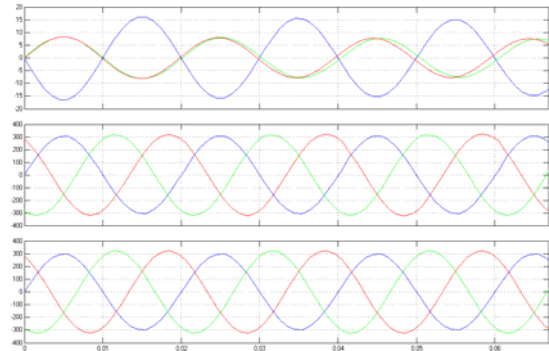
Seperti pada Gambar 12, *maximum error* untuk komponen asimetris pada keadaan *steady state* adalah 8.4 V. LPF dapat mengkompensasi dengan baik setelah *computing time* selama 0.028s. DC-Link *error* dan *symmetrical components error* ditunjukkan pada Gambar 13 dan 14.

Untuk kompensator PID, *maximum error* untuk komponen asimetris pada keadaan *steady state* dapat mencapai 0.000V namun sangat sulit untuk memperoleh parameter-parameter PID yang dapat

mempertahankan tingkat kesalahan tersebut dengan tidak konvergen.



Gambar 15. Respon Kesalahan dq pada Kompensator PID



Gambar 16. Respon Kesalahan Kompensasi Komponen Simetris pada Kompensator

Perbandingan diantara dua model kompensator (LPF dan PID) untuk mengkompensasi sistem dengan tegangan tiga fasa asimetris diberikan pada tabel berikut ini.

Tabel 4.1 Perbandingan Unjuk Kerja Kompensator LPF dan PID

Indikator	LPF	PID
Maximum Overshoot (V)	316.7	337.1
Error Steady State (V)	8.4	0.5
Time Settling (s)	0.028	0.000
DC-voltage	tanpa Osilasi	Berosilasi
Computing Time (s) Simulation Time=5,step 0.01	Cepat	Lambat
Mendapatkan parameter	Mudah	Sangat sulit
Sinyal Respon	Konvergen	Kadangkala tidak

		konvergen
--	--	-----------

Dari tabel diatas dapat diketahui bahwa kompensator LPF menghasilkan tegangan DC tanpa osilasi tetapi mempunyai *error steady state* yang cukup tinggi. Kompensator PID menghasilkan respon yang lebih cepat dan dengan error yang kecil. Namun demikian terdapat osilasi pada kompensator PID dan sulit mengontrol parameternya.

## 7. KESIMPULAN

Kesimpulan yang dapat diperoleh dari penelitian ini adalah:

1. Komparator jenis *Low Pass Filter* (LPF) merupakan pilihan terbaik bila ditemukan kesulitan dalam menentukan parameter untuk Komparator jenis PID.
2. Kelemahan penggunaan Komparator jenis LPF adalah adanya error steady-state yang cukup besar yaitu 8.4, namun hal ini dapat

dikompensasi dengan penggunaan rangkaian kompensasi.

3. Berdasarkan tegangan DC yang dihasilkan, Komparator jenis LPF mempunyai unjuk kerja yang lebih baik dibanding Komparator jenis PID karena tegangan DC yang dihasilkan tidak berosilasi, sedangkan tegangan DC yang dihasilkan melalui Komparator PID merupakan tegangan DC yang berosilasi.

## REFERENSI

- [1]. Werner Leonhard, *Control of Elctrical Drives*, 3<sup>rd</sup> edition, Springer 2001.
- [2]. Bimal K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice hall 2002.
- [3]. Bödefeld-Sequens, *Elektrische Maschinen: eine Einführung in die Grundlagen*, Springer 1971.
- [4]. Guasch, Corcoles, Pedra, *Effects of Asymmetrical Voltage Sags on Induction Motors*, Spain 2000