



Perancangan *boost converter* menggunakan kontrol proporsional integral (PI) sebagai suplai tegangan *input* inverter satu fasa untuk sistem *uninterruptible power supply*

Teguh Tri Arvianto ^{a,1}, Endro Wahjono ^a, Irianto Irianto ^a

^aProgram Studi Teknik Elektro Industri, Politeknik Elektronika Negeri Surabaya, Kampus ITS Jl. Raya ITS, Keputih, Kecamatan Sukolilo, Kota Surabaya, Jawa Timur, 60111, Indonesia

¹E-mail: teguhtriarvianto@pe.student.pens.ac.id

INFO ARTIKEL

Riwayat artikel:

Diajukan pada 6 Juli 2020

Direvisi pada 23 Juli 2020

Disetujui pada 10 Oktober 2020

Tersedia daring pada 15 November 2020

Kata kunci:

Boost converter, kontrol proporsional integral, *uninterruptible power supply*.

Keywords:

Boost converter, control proportional integral, *uninterruptible power supply*.

ABSTRAK

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan pokok dalam menunjang berbagai sektor kegiatan manusia. Namun, dalam realisasinya, PT. PLN menemui kendala seperti terputusnya jalur distribusi listrik ke pelanggan. Untuk mengantisipasi terjadinya pemadaman listrik, maka dibutuhkan peralatan seperti *uninterruptible power supply* (UPS) sebagai sistem *back up supply*. Pada penelitian ini, rancangan sistem UPS terdiri dari baterai, *boost converter*, *full-bridge inverter* satu fasa, serta filter LC yang digunakan sebagai suplai energi listrik untuk beban induktif dengan kriteria regulasi tegangan dan regulasi harmonisa sesuai standar yang berlaku. Agar sistem dapat dioperasikan secara terintegrasi, maka terdapat kontrol PI dengan nilai K_p yaitu 5 dan K_i yaitu 40 sebagai pengatur tegangan *output boost converter* sebesar 311 V_{DC} yang diperoleh melalui perhitungan analitik. Adapun rancangan *boost converter* memiliki kapasitas daya sebesar 720 Watt. Hasil simulasi menunjukkan nilai *drop* tegangan *output* maksimum UPS sebesar 3,5 V_{AC} terhadap standar tegangan nominal 220 V_{AC}, serta menghasilkan bentuk gelombang tegangan dan arus *output* sinusoidal dengan suplai energi listrik maksimum menuju beban sebesar ±463 VA.

ABSTRACT

Electrical energy is one of the basic needs in supporting various sectors of human activity. However, in its realization, PT. PLN encountered problems such as disconnection of electricity distribution lines to customers. To anticipate a power outage, equipment such as an uninterruptible power supply (UPS) is needed as a back up supply system. In this research, the UPS system design consists of a batteries, boost converter, single-phase full-bridge inverter, and an LC filter which is used as an electrical energy supply for inductive loads with the criteria of voltage regulation and harmonic regulation according to applicable standards. In order for the system to be operated in an integrated manner, there is a PI control with a value of K_p is 5 and K_i is 40 as a boost converter output voltage regulator of 311 VDC which is obtained through analytic calculations. The design of boost converter has a power capacity of 720 Watt. The simulation results show the maximum UPS output voltage drop value of 3.5 VAC against the nominal voltage standard of 220 VAC, and produce a sinusoidal output voltage and current waveform with a maximum supply of electrical energy to the load of ± 463 VA.

Tersedia pada: <http://dx.doi.org/10.36055/tjst.v16i2.8511>.

1. Pendahuluan

Energi listrik merupakan salah satu kebutuhan pokok dalam menunjang berbagai sektor kegiatan manusia. Adanya peningkatan jumlah penduduk dan perkembangan teknologi serta informasi yang semakin cepat mengakibatkan terjadinya peningkatan kebutuhan energi listrik. Namun, dalam realisasi distribusi listrik ke masyarakat oleh PT. PLN selaku perusahaan penyedia energi listrik di Indonesia, terdapat berbagai kendala salah satunya yaitu terputusnya pasokan energi listrik ke beban. Terjadinya pemadaman listrik secara tiba-tiba merupakan hal yang tidak bisa dihindari, terutama saat menggunakan perangkat elektronik [1]. Berbagai hal dapat menjadi penyebab terputusnya suplai energi listrik ke pelanggan yaitu kegiatan pemeliharaan



maupun perbaikan jaringan listrik oleh PT. PLN, faktor alam seperti sambaran petir dan pohon, atau bahkan sebab lain seperti tersangkutnya layang-layang pada jalur distribusi maupun transmisi. Terjadinya pemadaman listrik ini menimbulkan banyak kerugian karena dapat mengganggu berbagai aktifitas manusia akibat tidak beroperasinya peralatan elektronik. Bahkan kerugian yang ditimbulkan dapat mengakibatkan kerusakan baik secara *software* maupun *hardware*. Selain itu, hilangnya suplai energi listrik pada peralatan elektronik juga dapat mengakibatkan kesalahan koordinasi akibat tidak dapat berfungsinya peralatan komunikasi ataupun peralatan *monitoring* [2].

Uninterruptible power supply (UPS) merupakan suatu perangkat yang dapat menjaga kontinuitas suplai energi listrik ketika suatu peralatan elektronik kehilangan energi dari sumber utamanya [3]. Sehingga, UPS dapat digunakan untuk mengantisipasi terjadinya pemadaman listrik secara tiba-tiba yang dilakukan oleh PT. PLN. Menurut prinsip kerjanya, UPS dapat dikategorikan menjadi tiga tipe, yaitu tipe *off-line*, *on-line*, dan *line-interactive* [4]. Pada penelitian ini, dibahas mengenai perancangan sistem UPS tipe *off-line* sebagai *back up supply* sementara untuk jenis beban induktif. Adapun terdapat beberapa komponen penyusun dalam rancangan sistem UPS pada penelitian yaitu terdiri dari baterai, *boost converter*, inverter jenis *fullbridge* satu fasa, dan filter pasif LC.

Pada rancangan sistem UPS, terdapat baterai yang berfungsi sebagai sumber tegangan DC untuk menyimpan energi listrik. Tegangan *output* dari baterai selanjutnya dinaikkan oleh *boost converter* untuk DC bus sebagai *input* pada inverter satu fasa. Pemilihan kontrol proporsional integral (PI) yang digunakan sebagai pengaturan tegangan *output boost converter* karena sesuai untuk pengaturan proses suatu *plant* yang membutuhkan respon relatif cepat [5], seperti pada aplikasi sistem UPS sebagai sistem *back up supply*. Kontrol PI mempunyai prinsip kerja dengan cara membandingkan tegangan *output converter* terhadap nilai *set point* yang dikehendaki sebesar $311 V_{DC}$, sehingga dapat menghasilkan sinyal penyulutan *pulse width modulation* (PWM) yang sesuai [6]. Pemilihan kontrol PI ini juga didasari pada implementasi kontrol yang secara luas telah banyak digunakan, karena desain yang sederhana dan mudah untuk diimplementasikan pada pengaturan sistem [7]. Selanjutnya, terdapat *fullbridge* inverter satu fasa dengan jenis penyulutan unipolar PWM inverter untuk mengkonversi tegangan DC menjadi tegangan AC 220 Volt. Jenis penyulutan ini memberikan kinerja yang lebih baik daripada menggunakan teknik penyulutan bipolar PWM inverter, karena dapat menghasilkan faktor *ripple* pada *output* yang bernilai lebih kecil [8]. Namun, pada *output* inverter masih belum menghasilkan bentuk sinyal *output* sinusoidal, sehingga terdapat filter pasif LC untuk mereduksi harmonisa. Jenis filter LC ini memiliki keunggulan yaitu memiliki desain sistem yang sederhana dan cukup efektif dalam meredam harmonisa [9], sehingga pada *output* UPS dapat menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal sesuai dengan frekuensi jala-jala PLN sebesar 50 Hz.

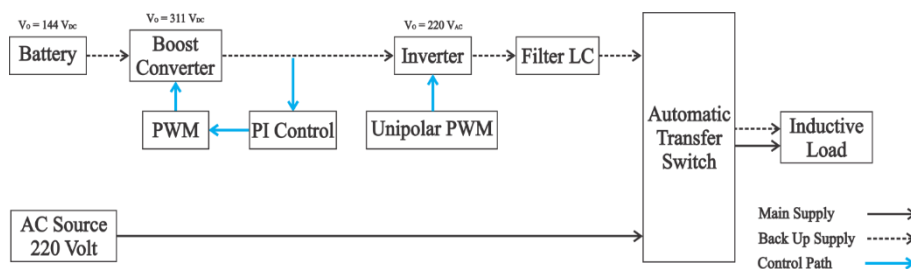
Penambahan kontrol PI bertujuan untuk mengantisipasi adanya *drop* tegangan yang dapat terjadi pada sisi *output* suatu rangkaian elektronika yang dipengaruhi akibat adanya perubahan nilai resistansi pada beban maupun perubahan nilai tegangan sumber. *Drop* tegangan ini tidak diinginkan pada implementasi suatu rangkaian elektronika, karena dapat mengurangi performa kerja dari peralatan yang digunakan. Selain itu, kontrol PI juga diperlukan agar sistem UPS dapat dioperasikan secara terintegrasi, sehingga rancangan UPS diharapkan mampu menghasilkan *output* berupa kriteria regulasi tegangan sesuai dengan SPLN 1:1995 dan regulasi harmonisa sesuai dengan standar IEEE 519.1992.

2. Metodologi Penelitian

Rancangan sistem UPS terdiri dari baterai sebagai sumber tegangan DC, *boost converter* sebagai penaik tegangan *output* dari baterai, *fullbridge inverter* satu fasa untuk mengubah tegangan DC menjadi tegangan AC, serta filter LC untuk mereduksi harmonisa. Pada sistem UPS terdapat kontrol proporsional integral (PI) untuk mengatur tegangan *output boost converter* bernilai konstan sebagai DC bus pada *input* inverter satu fasa. Untuk mengetahui performa dari hasil perancangan sistem, maka dilakukan simulasi secara parsial menggunakan *software* PSIM dan Matlab. Selanjutnya, apabila performa pada hasil simulasi masing-masing komponen penyusun sistem UPS telah sesuai dengan rancangan sistem yang dikehendaki, maka dapat dilakukan simulasi sistem secara integrasi menggunakan *software* PSIM.

2.1. Blok Diagram Sistem

Rancangan blok diagram *sistem uninterruptible power supply* (UPS) yang diajukan pada penelitian ini sesuai pada Gambar 1.



Gambar 1. Blok diagram sistem.

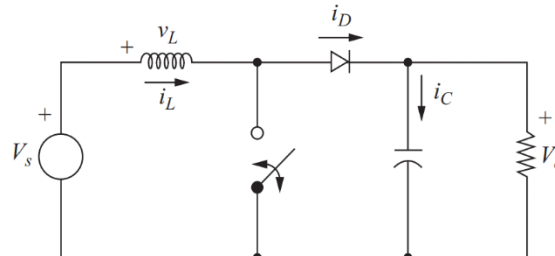
Berdasarkan blok diagram sistem pada Gambar 1, prinsip kerja dari rancangan sistem UPS pada penelitian ini yaitu ketika terjadi pemadaman listrik yang dilakukan oleh PT. PLN, maka terjadi perpindahan suplai energi listrik menuju beban menggunakan *automatic transfer switch* (ATS). Energi listrik menuju beban kemudian disuplai oleh sumber energi listrik alternatif UPS yang berasal dari baterai 12 Volt berjumlah 12 yang dirangkai secara seri sehingga diperoleh tegangan *output* baterai sebesar $144 V_{DC}$. Tegangan *output* dari baterai selanjutnya dinaikkan oleh *boost converter* sebagai *input* pada inverter satu fasa. Pada *boost converter* terdapat kontrol PI yang berfungsi untuk menentukan nilai *duty cycle* pada pembangkitan *pulse width modulation* (PWM), sehingga dapat diperoleh tegangan *output* yang bernilai konstan $311 V_{DC}$. Tegangan *output boost converter* selanjutnya akan dikonversi menjadi tegangan $220 V_{AC}$ oleh inverter satu fasa menggunakan metode unipolar PWM. Pada *output* inverter, terdapat filter pasif LC untuk mereduksi harmonisa sehingga sistem UPS dapat menghasilkan bentuk gelombang sinusoidal.

2.2. Baterai

Baterai merupakan suatu peralatan yang terdiri dari susunan beberapa sel listrik sebagai sumber energi listrik [10]. Baterai dapat menyimpan energi listrik dalam bentuk muatan listrik. Muatan listrik (Wh) yang disimpan pada baterai bernilai sebanding terhadap nilai tegangan baterai (V) dan kapasitas baterai (Ah).

2.3. Perancangan Boost Converter

Komponen penyusun rangkaian *boost converter* antara lain sumber tegangan DC (V_s), induktor (L), saklar elektronik, dioda, kapasitor *output* (C), dan beban resistor (R) [11]. Rangkaian ekuivalen *boost converter* ditunjukkan seperti pada Gambar 2.



Gambar 2. Rangkaian ekuivalen *boost converter*.

Adapun juga terdapat beberapa nilai komponen pada parameter yang diperlukan untuk perancangan *boost converter* adalah seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Nilai parameter pada perancangan *boost converter*.

Parameter	Nilai
Tegangan sumber DC (V_s)	144 VDC
Tegangan <i>output</i> (V_o)	311 VDC
Induktor (L)	885 μ H
Kapasitor (C)	52 μ F
Resistansi (R)	140 Ω
Frekuensi <i>switching</i> (Fs)	80 KHz

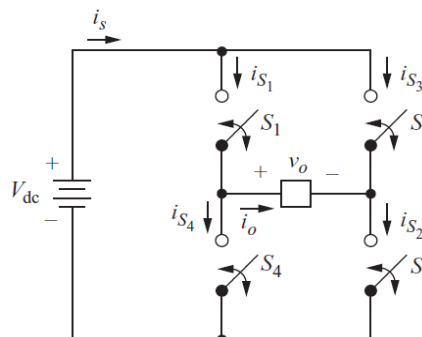
Besarnya tegangan *output* pada *boost converter* dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (1).

$$V_o = \frac{V_{in}}{1 - D} \quad (1)$$

Dengan memasukkan parameter yang telah ditentukan pada Tabel 1, maka nilai *duty cycle* (D) yang diperoleh yaitu sebesar 53,7 %.

2.4. Perancangan Fullbridge Inverter Satu Fasa

Inverter merupakan suatu rangkaian yang terdiri dari saklar elektronik yang berfungsi untuk mengkonversikan tegangan searah (DC) menjadi tegangan bolak-balik (AC) melalui proses pensaklaran yang tepat secara periodic [12]. *Fullbridge* inverter merupakan salah satu jenis dasar rangkaian inverter yang digunakan pada sistem tenaga.



Gambar 3. Rangkaian *fullbridge* inverter satu fasa.

Gambar 3 menunjukkan rangkaian *fullbridge* inverter yang memuat 4 buah perangkat saklar elektronik dimana terdapat dua buah perangkat saklar elektronik pada setiap lengan inverter [13]. Pada perancangan *fullbridge* inverter satu fasa, jenis penyulutan inverter yang digunakan yaitu metode *switching unipolar* PWM inverter memiliki 2 sinyal gelombang sinus (sinyal referensi) yang saling *inverting* dengan frekuensi sebesar 50 Hz, sesuai dengan frekuensi dari jala-jala PLN. Sedangkan frekuensi yang digunakan pada sinyal segitiga (sinyal *carrier*) pada simulasi yaitu sebesar 10 KHz.

2.5. Perancangan Filter LC

Filter LC berfungsi untuk menghilangkan frekuensi harmonisa dari suatu gelombang yang tidak diinginkan. Hasil keluaran dari filter ini diharapkan sudah berupa gelombang sinus murni dengan melewati frekuensi fundamental 50 Hz dan menghilangkan frekuensi harmonisa selain frekuensi fundamentalnya. Pemasangan filter induktor L secara seri terhadap beban mampu memperbaiki karakteristik gelombang arus *output* nonsinusoidal inverter. Sedangkan pemasangan filter kapasitor C secara paralel terhadap beban mampu digunakan untuk memperbaiki karakteristik gelombang tegangan *output* nonsinusoidal inverter [14]. Pada desain filter LC, nilai kapasitansi kapasitor bernilai *fixed*, karena menyesuaikan nilai kapasitor yang ada di pasaran. Nilai induktansi pada filter dapat dihitung dengan memasukkan parameter filter yaitu nilai kapasitansi dan frekuensi *cut off*.

Tabel 2. Parameter desain filter LC.

Parameter	Nilai
C	5 μ F
$F_{Cut\ off}$	1 KHz

Parameter pada Tabel 4 selanjutnya dapat digunakan sebagai acuan dalam perhitungan nilai induktansi pada filter sebagai berikut.

$$F_{Cut\ Off} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

$$1.000 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \times 5 \times 10^{-6}}}$$

$$1.000^2 = \frac{1}{4\pi^2 \times L \times 5 \times 10^{-6}}$$

$$L = 5,066 \text{ mH.}$$

2.6. Perancangan Kontrol Proporsional Integral (PI)

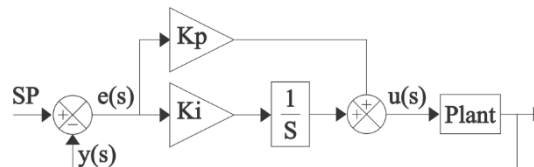
Rancangan kontrol PI pada penelitian ini digunakan sebagai pengaturan tegangan *output boost converter* sehingga dapat menghasilkan tegangan DC Bus yang konstan sebagai *input* inverter satu fasa pada sistem UPS. Kontrol PI terdiri dari parameter kontrol P (proporsional) dan parameter kontrol I (integral) yang masing-masing memiliki karakteristik tersendiri. Karakteristik dari kontrol P yaitu dapat mempercepat respon *output* dari suatu *plant* untuk mencapai suatu *set point*. Sedangkan karakteristik dari kontrol I dapat digunakan untuk memperkecil *error* saat kondisi *steady state* dari *output* suatu *plant* yang dikontrol. Hubungan antara sinyal *output* $u(t)$ dari suatu *plant* menggunakan kontrol P terhadap sinyal *error* $e(t)$ ditunjukkan pada persamaan (3).

$$u(t) = K_p \cdot e(t). \quad (3)$$

Sedangkan hubungan antara sinyal *output* $u(t)$ dari suatu *plant* menggunakan kontrol I terhadap sinyal *error* $e(t)$ ditunjukkan seperti persamaan (4).

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt. \quad (4)$$

Jumlahan dari kontrol P dan kontrol I menghasilkan kontrol PI, dimana kombinasi dari dua parameter kontrol tersebut dapat menutupi kekurangan dari masing-masing parameter kontrol [15]. Adapun blok diagram kontrol PI pada domain s ditunjukkan oleh Gambar 4.



Gambar 4. Blok diagram kontrol proporsional integral (PI).

Harga $e(s)$ merupakan harga yang diperoleh antara selisih harga tegangan yang dicapai (*set point*) dengan sinyal tegangan *output* *plant* yang dikontrol $y(s)$, serta $u(s)$ adalah sinyal *output* kontrol PI. Sehingga fungsi alih (*transfer function*) dari kontrol PI dapat dinyatakan dalam domain frekuensi [16] sebagai berikut:

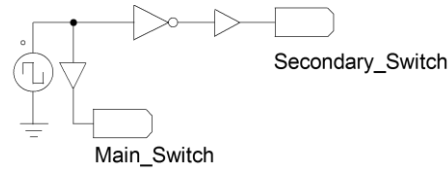
$$G_C(s) = \frac{u(s)}{e(s)} = K_p + \frac{1}{\tau_i s}, \quad (5)$$

$$G_C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}. \quad (6)$$

2.7. Perancangan Automatic Transfer Switch (ATS)

Automatic transfer switch (ATS) merupakan saklar perpindahan yang terdiri dari relai ataupun kontaktor. Fungsi ATS yaitu melakukan pergantian suplai pada sumber daya listrik dengan proses yang cepat serta dilakukan secara otomatis oleh unit sistem kontrol, sehingga durasi pemadaman listrik dapat terjadi secara singkat [17]. Pada penelitian ini, terdapat saklar peralihan yang diasumsikan sebagai dua buah saklar elektronik yaitu *main switch* (saklar utama)

yang menghubungkan suplai beban dari sumber utama dan *secondary switch* (saklar sekunder) yang menghubungkan suplai beban dari sistem UPS. Skema kerja dari saklar peralihan ini yaitu saling *interlock*. Terdapat 2 buah saklar sekunder yang bekerja secara serempak pada *input* dan *output* sistem UPS. Skema kerja dari saklar peralihan yaitu bergantung dari pulsa yang dibangkitkan oleh rangkaian pembangkit pulsa. Ketika terdapat sinyal pulsa bernilai logika 1, maka posisi saklar utama akan tertutup dan saklar sekunder menjadi terbuka sehingga beban akan disuplai oleh sumber utama. Sedangkan apabila terdapat sinyal pulsa bernilai logika 0, maka posisi saklar utama pada *grid* PLN akan terbuka, sedangkan saklar sekunder menjadi tertutup. Pada kondisi ini suplai menuju beban berasal dari sistem UPS. Adapun juga rangkaian kontrol yang digunakan pada penyulutan sistem saklar peralihan ditunjukkan seperti pada Gambar 5.



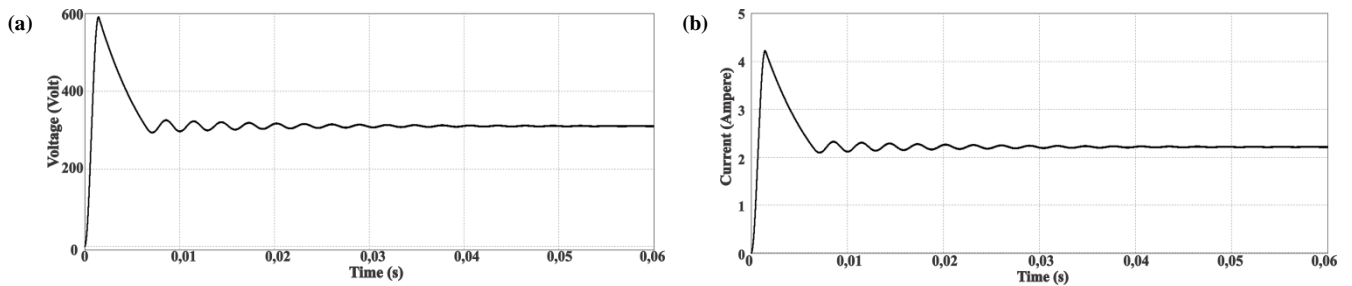
Gambar 5. Rangkaian pembangkit pulsa pada penyulutan sistem saklar peralihan.

3. Hasil dan Pembahasan

3.1. Boost Converter

3.1.1. Simulasi open-loop boost converter

Simulasi *boost converter* secara *open-loop* dilakukan untuk menguji kehandalan dalam menaikkan tegangan *output* dari baterai. Pada simulasi ini baterai diasumsikan sebagai sumber tegangan DC (V_s). Untuk simulasi *boost converter* secara *open-loop* ini, proses pensaklaran pada *converter* dibangkitkan oleh rangkaian pembangkit pulsa. Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, saat kondisi untuk harga nominal, *boost converter* mampu menghasilkan tegangan *output* pada kondisi *steady state* sebesar 311,2 V_{DC} dengan arus *output* sebesar 2,22 A seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. – (a) Gelombang tegangan *output* simulasi *boost converter*; (b) Gelombang arus *output* simulasi *boost converter*.

3.1.2. Pemodelan kontrol proporsional integral (PI)

Pemodelan kontrol PI pada penelitian ini diperoleh melalui perhitungan secara analitik. Adapun parameter yang diperlukan untuk pemodelan sistem yang diperoleh dari respon sinyal tegangan *output* hasil simulasi pada PSIM ditunjukkan sesuai pada Tabel 3.

Tabel 3. Tanggapan sistem *open-loop boost converter*.

Parameter	Tanggapan sistem
Tegangan <i>steady state</i> (YSS)	311,2 V
Target tegangan (XSS)	311 V
<i>Peak time</i> (t_p)	1,45 ms
<i>Time settling</i> (t_s)	21,82125 ms

Dalam membuat pemodelan *boost converter*, nilai k merupakan suatu konstanta perbandingan antar nilai tegangan dari sistem *open-loop* terhadap nilai *set point* yang ingin dicapai saat kondisi *steady state*.

$$k = \frac{Y_{ss}}{X_{ss}} \quad (7)$$

$$= \frac{311,2}{2} = 1,000643087$$

Adapun hasil pemodelan *transfer function plant* $G(s)$ yang diperoleh dari tanggapan sistem pada simulasi secara *open-loop* adalah sesuai dengan persamaan (8).

$$G(s) = \frac{k}{\left(\frac{1}{\omega_n} s\right)^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} s + 1} \tag{8}$$

$$= \frac{1,000643087}{2,11348 e^{-7} s^2 + 7,74822 e^{-5} s + 1}$$

Keterangan:

- k = konstanta
- ξ = Rasio redaman
- ω_n = Frekuensi alami tak teredam.

Setelah diperoleh persamaan *transfer function* dari sistem *open-loop*, kemudian kembali dilakukan perhitungan secara analitik untuk mencari nilai parameter pada kontrol PI sebagai berikut:

$$K_p = \frac{\tau_i}{\tau^* \times k} \tag{9}$$

$$= \frac{0,7748 \times 10^{-6}}{2,5 \times 10^{-3} \times 1,000643087} = 0,030972$$

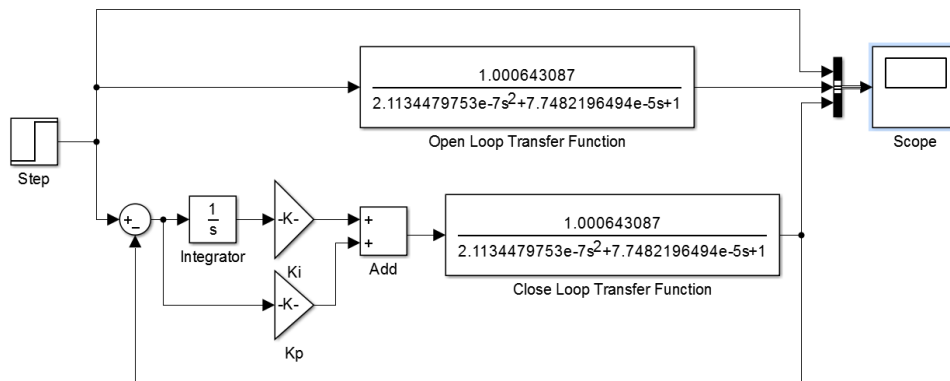
$$K_i = \frac{K_p}{\tau_i} \tag{10}$$

$$= \frac{0,030972}{0,7748 \times 10^{-6}} = 399,7$$

Keterangan:

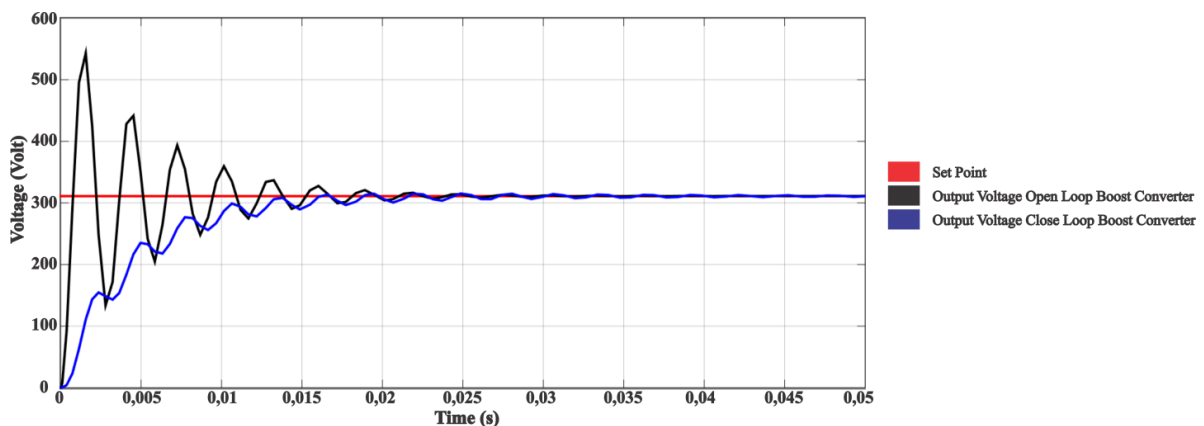
- τ^* = Konstanta waktu baru
- τ_i = Kontanta waktu integral
- K_p = Konstanta proporsional
- K_i = Konstanta integral

Transfer function hasil perhitungan tersebut selanjutnya dapat disimulasikan untuk membandingkan sinyal respon sistem *open-loop* dan *close-loop* terhadap *set point*. Adapun rangkangkaian simulasi *transfer function* dari *boost converter* pada penelitian ini ditunjukkan seperti pada Gambar 7.



Gambar 7. Rangkaian simulasi pemodelan kontrol PI pada *boost converter*.

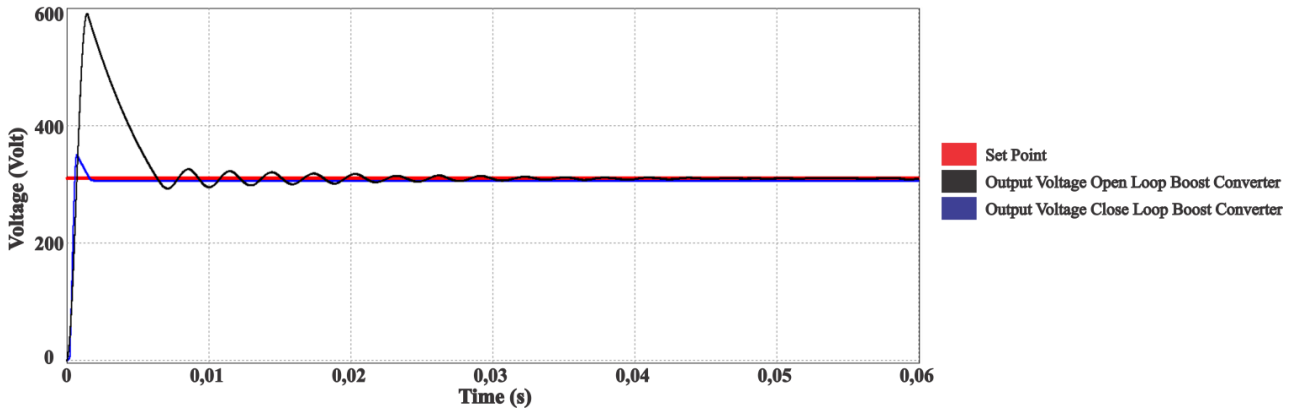
Simulasi *transfer function* yang diuji dengan *input* berupa sinyal *step* sebesar 311 Volt telah berhasil dilakukan seperti pada Gambar 8.



Gambar 8. Hasil simulasi *transfer function plant*.

3.1.3. Simulasi kontrol proporsional integral (PI) pada close-loop boost converter

Nilai Kp dan Ki pada simulasi *close-loop boost converter* yang diperoleh dari perhitungan secara analitik ini masih perlu dilakukan *tunning* parameter secara *trial and error* untuk memperoleh respon *plant* yang sesuai. Adapun parameter kontrol yang diperoleh berdasarkan hasil simulasi menggunakan *software PSIM* yaitu parameter Kp menjadi bernilai 5 sedangkan parameter Ki bernilai 40. Hasil simulasi *close-loop boost converter* menggunakan kontrol PI mampu menghasilkan harga efektif tegangan *output* sebesar 306,67 V_{DC} untuk kondisi *steady state* saat beban bernilai nominal. Pada simulasi ini, nilai untuk *set point* yang dikehendaki yaitu sebesar 311 V_{DC} yang merupakan nilai tegangan *input* yang diperlukan oleh inverter agar dapat menghasilkan tegangan 220 V_{AC} secara teori.



Gambar 9. Perbandingan respon sinyal tegangan *output boost converter* secara *open-loop* dan *close-loop* terhadap *set point* sebesar 311 V_{DC}.

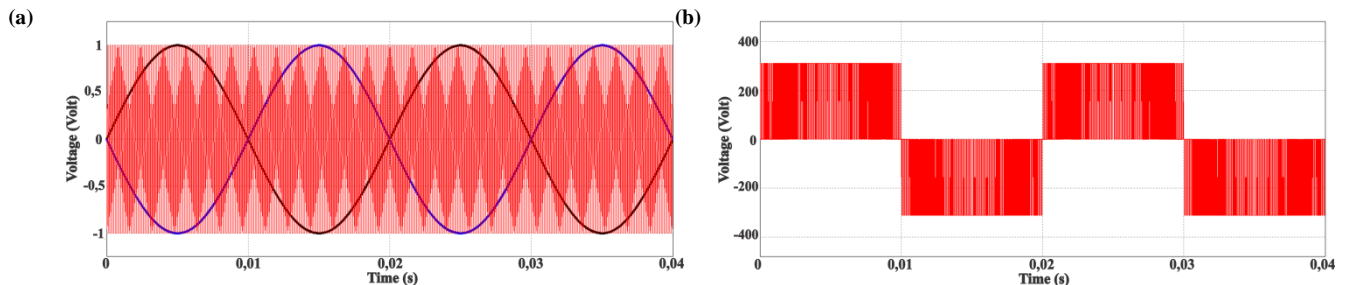
Pada Gambar 9 menunjukkan bahwa hasil rancangan sistem kontrol PI pada *boost converter* telah sesuai. Salah satu parameter keberhasilan dari rancangan sistem kontrol yaitu berupa terjadi penurunan nilai prosentase *overshoot* menjadi 14,01%, dimana pada umumnya rancangan sistem suatu kontrol memiliki desain dengan prosentase nilai *overshoot* sekitar 5-25%. Adapun rancangan sistem kontrol mampu memperbaiki beberapa karakteristik tanggapan *transient* menjadi lebih baik. Untuk lebih jelasnya, perbandingan perbandingan karakteristik tanggapan *transient* pada respon tegangan *output* hasil simulasi dari *close-loop boost converter* menggunakan kontrol PI dan respon tegangan *output open-loop boost converter* secara parsial ditunjukkan sesuai pada Tabel 4.

Tabel 4. Perbandingan karakteristik tanggapan *transient* sistem tegangan *output boost converter* secara *open-loop* dan *close-loop*.

Karakteristik tanggapan sistem	Open-loop	Close-loop
Time delay (Td)	0,495 ms	0,40875 ms
Time settling (Ts)	21,82125 ms	1,592 ms
Rise time (Tr)	0,75 ms	0,58875 ms
Peak time (Tp)	1,45 ms	0,7325 ms
Overshoot	90,03%	14,01%

3.2. Fullbridge Inverter Satu Fasa

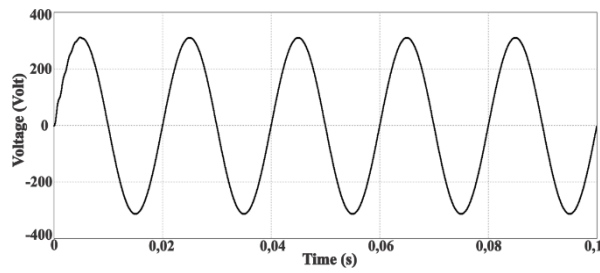
Terdapat 3 kondisi pada tegangan *output* pada inverter dengan metode penyulutan unipolar PWM yaitu tegangan positif, nol dan negatif seperti pada Gambar 10.



Gambar 10. – (a) Komparasi sinyal penyulutan unipolar PWM inverter satu fasa;
(b) Gelombang tegangan *output* simulasi unipolar PWM inverter.

3.3. Filter LC

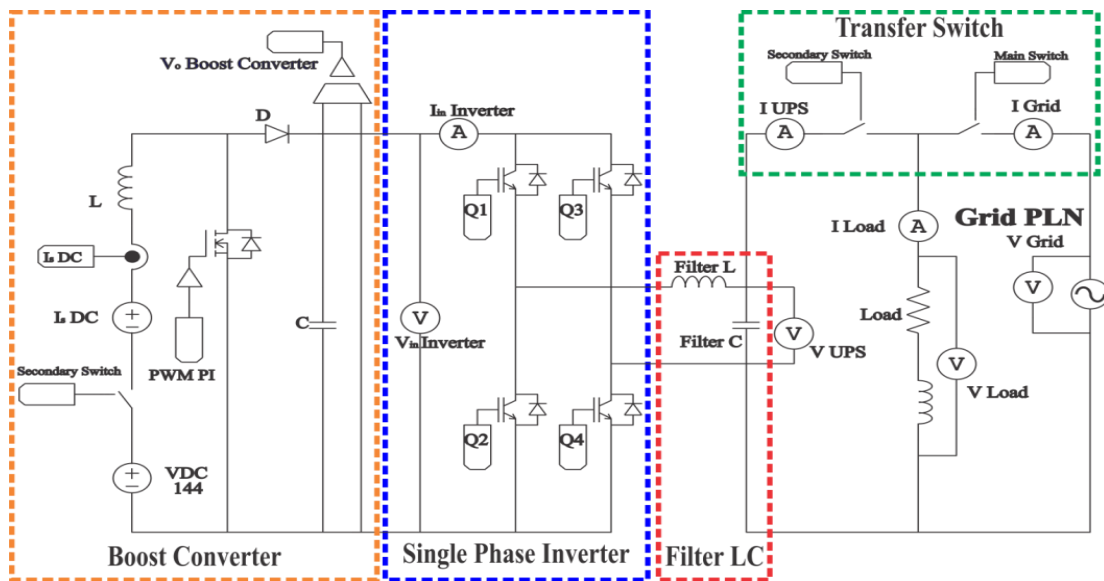
Hasil simulasi menunjukkan bahwa desain perhitungan filter LC berhasil mereduksi harmonisa sehingga sinyal tegangan *output* filter LC pada inverter dengan metode pensaklaran unipolar PWM, sehingga menghasilkan bentuk gelombang tegangan *output* sinusoidal seperti pada Gambar 11.



Gambar 11. Gelombang tegangan *output* unipolar PWM inverter setelah filter LC.

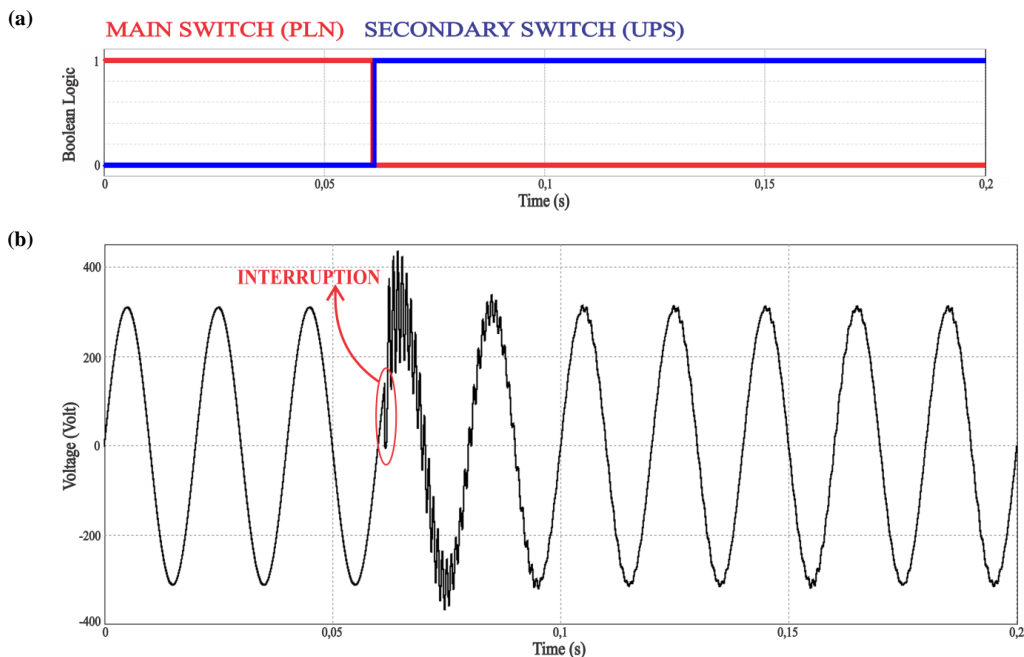
3.4. Simulasi Integrasi Sistem

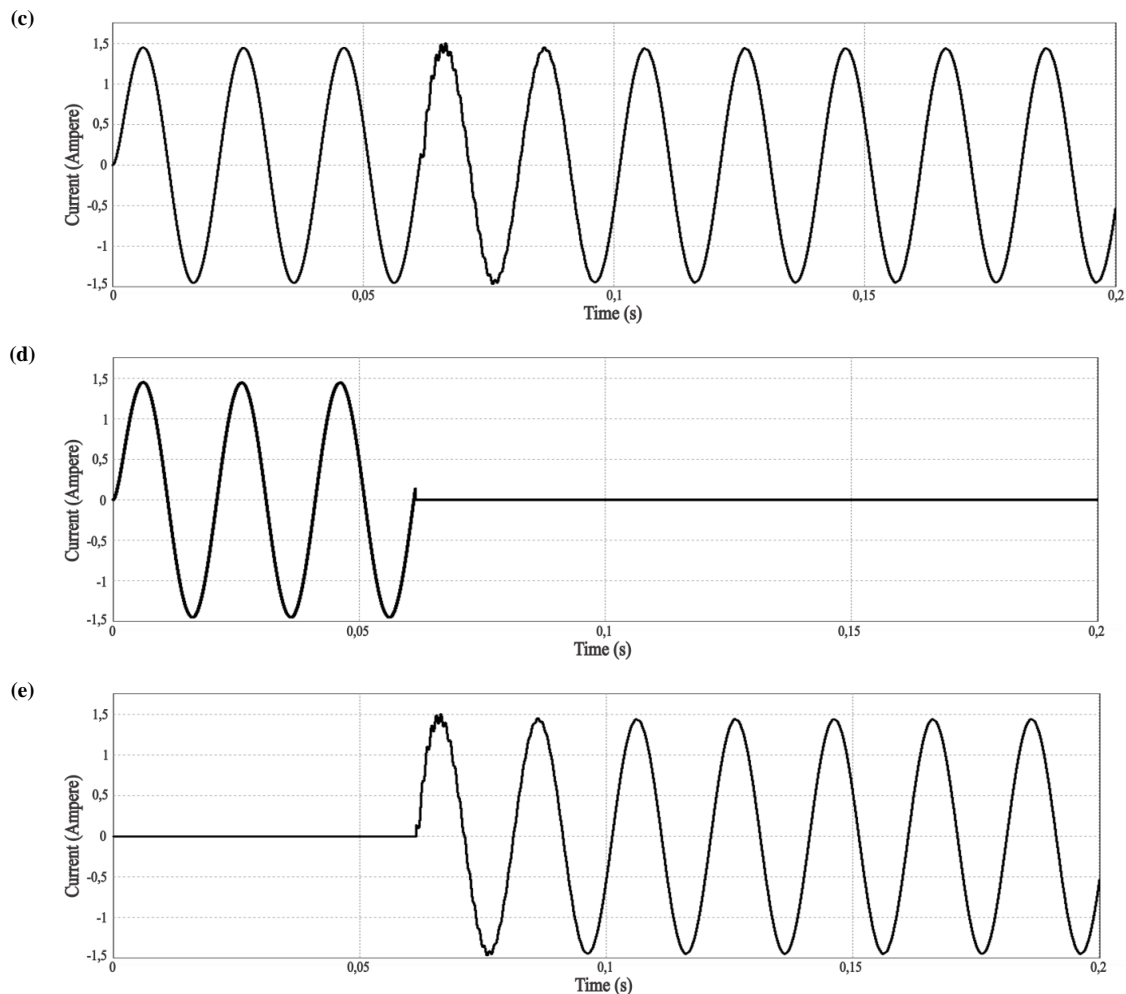
Untuk simulasi yang dilakukan secara integrasi ini terdiri dari simulasi *close-loop boost converter*, inverter satu fasa, filter LC sebagai komponen penyusun sistem *back up supply* UPS, serta sumber jala-jala PLN sebagai *main supply* dan *transfer switch* atau saklar peralihan. Fungsi dari saklar peralihan yaitu untuk melakukan pergantian suplai energi listrik menuju beban dari sumber utama jala-jala PLN menjadi suplai energi listrik cadangan UPS. Rangkaian integrasi pada simulasi sistem UPS ditunjukkan seperti pada Gambar 12.



Gambar 12. Rangkaian simulasi integrasi sistem.

Selanjutnya dilakukan simulasi sistem integrasi dengan menggunakan beban induktif untuk mengetahui kinerja sistem pada saat terjadi gangguan pada sumber utama suplai energi listrik menuju beban. Respon yang dihasilkan rancangan UPS sebagai sistem *back up supply* ditunjukkan seperti pada Gambar 13.





Gambar 13. – (a) Sinyal pulsa penyulutan sistem saklar peralihan; (b) Gelombang tegangan *output* beban; (c) Gelombang arus *output* beban; (d) Gelombang arus *output* beban dari jala-jala PLN; (e) Gelombang arus *output* beban dari sistem UPS.

Respon sistem pada Gambar 13. menunjukkan hasil simulasi sistem integrasi dengan saklar peralihan untuk jenis beban induktif telah mampu beroperasi sesuai dengan hasil yang dikehendaki yang dapat diketahui dari gelombang arus hasil simulasi. Ketika sinyal penyulutan pada saklar utama (warna merah) bernilai logika satu, maka beban terhubung dengan suplai utama, sehingga arus yang menuju beban tersuplai dari sumber tegangan *grid* / jala-jala PLN. Sedangkan saat sinyal penyulutan pada saklar sekunder (warna biru) bernilai logika satu, maka beban menjadi terhubung dengan sistem UPS, sehingga arus yang menuju beban tersuplai dari sistem UPS. Respon yang dihasilkan sistem tersebut juga menunjukkan adanya gangguan *transient* berupa *voltage interruption* sesaat yang kemudian diikuti dengan osilasi yang selama kurang dari 2 cycle. Adanya gejala *transient* berupa *voltage interruption* dengan durasi selama $\pm 0,6675$ ms dan timbulnya osilasi yang terjadi diawal respon sistem ini disebabkan karena adanya pergantian suplai energi listrik menuju dari *grid* PLN menjadi sistem UPS. Sedangkan pada gelombang arus tidak menunjukkan adanya gejala gangguan *interruption*, dikarenakan jenis beban yang digunakan merupakan beban induktif yang memiliki karakteristik gelombang arus tertinggal terhadap gelombang tegangan. Untuk menguji kehandalan dari performa sistem dalam bidang kualitas daya, dilakukan pengambilan data pada simulasi dengan membuat variasi impedansi beban (resistansi dan induktansi beban) yang ditunjukkan seperti pada Tabel 5.

Tabel 5. Hasil simulasi integrasi sistem

V_o Boost Converter (V)	R (Ω)	L (H)	V_o (V)	I_o (A)	PF	P (W)	S (VA)	THD _v (%)	THD _i (%)
310,9	400	0,05	220,2	0,550	0,999	121,0	121,1	1,209	0,944
310,8	400	0,1	220,1	0,549	0,997	120,4	120,7	1,623	0,869
310,8	400	0,25	220,1	0,540	0,982	116,6	118,8	2,098	0,546
310,8	400	0,5	220,1	0,512	0,933	104,8	112,6	4,736	0,636
310,0	200	0,05	219,4	1,094	0,997	239,2	240,0	1,723	0,917
310,1	200	0,1	219,3	1,083	0,988	234,6	237,5	1,576	0,506
310,2	200	0,25	219,2	1,020	0,933	208,0	223,5	1,907	0,289
310,6	200	0,5	219,3	0,862	0,798	148,7	189,0	2,470	0,213
309,5	150	0,05	218,6	1,449	0,995	315,0	316,8	2,242	0,974
309,5	150	0,1	218,4	1,425	0,979	304,6	311,3	2,420	0,608

V_o Boost Converter (V)	R (Ω)	L (H)	V_o (V)	I_o (A)	PF	P (W)	S (VA)	THD _v (%)	THD _i (%)
310,0	150	0,25	218,4	1,290	0,891	249,6	281,7	1,709	0,234
310,7	150	0,5	218,9	1,008	0,709	152,4	220,6	2,894	0,214
308,0	100	0,05	216,5	2,138	0,988	457,3	463,0	2,868	1,040
308,3	100	0,1	216,5	2,065	0,955	426,4	447,1	3,065	0,306
309,9	100	0,25	217,4	1,709	0,798	292,2	371,6	1,858	0,253
311,9	100	0,5	219,6	1,178	0,565	138,9	258,7	5,435	0,389

Berdasarkan data pada tabel di atas menunjukkan masih terdapat regulasi nilai tegangan *output* (ΔV_o) beban yang dapat dinyatakan dalam bentuk prosentase. Regulasi tegangan *output* pada sistem UPS ini, selain dipengaruhi oleh arus beban, juga dapat terjadi karena adanya *ripple* dan *error* pada *output boost converter* sebagai DC Bus sistem UPS. Performa dari kontrol PI pada pengaturan tegangan *output boost converter* ini sudah cukup bagus dalam pengaturan tegangan *output boost converter*, dimana harga efektif pada sisi *output* mampu menghasilkan prosentase nilai *error* tegangan maksimum pada kondisi *steady state* sebesar 0,976% terhadap gangguan berupa variasi beban. Nilai prosentase tersebut masih dalam batas toleransi, dimana untuk jenis sistem orde dua seperti *boost converter*, memiliki batas nilai toleransi *error teady state* sebesar $\pm 5\%$. Hal tersebut kemudian berdampak pada performa *output* UPS dalam menghasilkan tegangan *output* yang mampu mendekati harga standar tegangan nominal PLN sebesar 220 V_{AC}. Adapun juga nilai harmonisa tegangan dan arus pada *output* UPS ini bernilai cukup rendah, sehingga gelombang arus dan tegangan dapat menghasilkan bentuk sinusoidal saat sistem UPS digunakan untuk memberikan suplai energi listrik ke beban.

4. Kesimpulan dan Saran

Berdasarkan hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa *drop* tegangan *output* sistem UPS dapat diperkecil dengan menambahkan umpan balik berupa kontrol PI pada *boost converter*. Nilai K_p adalah 5 dan K_i adalah 40 pada kontrol PI yang diperoleh melalui perhitungan secara analitik, mampu menghasilkan *error steady state* sebesar 1,4% saat digunakan untuk memberikan suplai ke beban nominal. Rancangan sistem kontrol menurunkan prosentase nilai *overshoot* sesuai dengan batas toleransi pada kriteria desain kontrol sebesar 5-25%. Selain itu, performa kontrol mampu digunakan untuk memperbaiki karakteristik tanggapan *transient* yang lain seperti *time delay*, *rise time*, *peak time*. Adapun performa kontrol PI sebagai pengatur tegangan *output* pada *boost converter* ketika dioperasikan secara terintegrasi pada sistem UPS menghasilkan prosentase *error steady state* maksimum sebesar 0,976% dari batas toleransi sebesar $\pm 5\%$. Sehingga, perancangan kontrol PI berhasil digunakan untuk memperbaiki regulasi tegangan *output* sistem UPS dengan diperoleh nilai prosentase *drop* tegangan maksimum sebesar 1,575% terhadap standar tegangan nominal sebesar 220 V_{AC} masih memenuhi standar SPLN 1:1995, dimana nilai prosentase *drop* tegangan maksimum sebesar 10%. Hasil rancangan sistem juga menunjukkan regulasi harmonisa yang masih memenuhi standar IEEE 519.1992, dengan nilai maksimum pengukuran harmonisa arus sebesar 1,04% terhadap standar harmonisa arus sebesar 15%. Sedangkan hasil pengukuran harmonisa tegangan, menunjukkan sebagian besar kandungan harmonisa tegangan masih memenuhi standar prosentase maksimum sebesar 5%, dimana *range* untuk harmonisa tegangan yaitu 1,209%-5,435% dengan nilai rata rata sebesar 2,49%. Dengan demikian, maka sistem UPS dapat diaplikasikan untuk memberikan suplai energi listrik pada beban induktif hingga sebesar ± 463 VA saat terjadi gangguan pada sumber utama jala-jala PLN. Adapun juga diperlukan pengembangan sistem kontrol agar performa *boost converter* dalam menghasilkan tegangan *output* dapat menjadi lebih baik sebagai DC Bus seperti logika fuzzy, maupun kombinasi kontrol yang lain. Selain itu juga dapat dilakukan penambahan sistem kontrol pada inverter, sehingga sistem UPS dapat menghasilkan regulasi tegangan *output* yang lebih baik. Untuk memperoleh regulasi harmonisa yang lebih baik, topologi rangkaian *fullbridge* inverter satu fasa dapat diganti dengan topologi inverter yang lain seperti topologi rangkaian multilevel inverter satu fasa yang mampu menghasilkan faktor *ripple* pada sisi *output* yang lebih rendah daripada topologi *fullbridge* inverter satu fasa.

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih diberikan kepada berbagai pihak yang telah memberikan fasilitas, bantuan, dukungan, dan saran beserta koreksi yang membangun dalam proses penyelesaian penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Bawotong, V. K., Mamahit, D. J., & Sompie, S. R. U. A. (2015). Rancang bangun *uninterruptible power supply* menggunakan tampilan LCD berbasis mikrokontroler. *E-journal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 4, no. 2, pp. 1-7.
- [2] Najoan, V. K., Wuwung, J. O., & Manembu, P. L. (2017). Rancang bangun *multiple-UPS switching system* berdasarkan variasi beban menggunakan microcontroller. *Jurnal Teknik Elektro dan Komputer*, vol. 6, no. 3, pp. 133-140.
- [3] Nagaraja, N. R., & Jayapal, R. (2012). Design of online ups system with over voltage, under voltage and phase out protection. *International Journal of Modern Engineering Research*, vol. 2, no. 5, pp. 3684-3688.
- [4] Aamir, M., & Mekhilef, S. (2016). Online transformerless uninterruptible power supply (ups) system with a smaller battery bank for low power applications. *IEEE Transaction on Power Electronics*, vol 32, no. 1.
- [5] Irkham, Setiawan, I., & Nugroho, A. (2018). Perancangan *boost converter* sebagai suplai inverter menggunakan DSPIC30F4011 dengan metode kontrol proporsional integral. *TRANSIENT*, vol 7, no. 3, pp. 737-744.
- [6] Vaniya, V. M., & Gajipara, J. G. (2013). Single phase PWM inverter with close loop DC-DC boost converter for solar application. *International Journal of Engineering Research & Technology*, vol. 2, no. 5, pp. 289-293.

- [7] Patel, P., & Bhuria, V. (2018). Closed loop control of solar powered boost converter with PI controller. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, vol. 7, no. 7, pp. 8012-8017.
- [8] Rashid, M. H. (1998). *Power Electronics: Circuit, Device and Application*. New Jersey: Prentice-Hall, Inc.
- [9] Kkadhim, R. A. (2019). Design and simulation of closed loop proportional integral (PI) controlled boost converter and 3-phase inverter for photovoltaic (PV) applications. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, vol. 15, no. 1, pp. 10-22.
- [10] Febrianto, R., Soedjarwanto, N., & Zebua, O. (2018). Rancang bangun *boost converter* untuk proses *discharging* baterai pada penerangan jalan umum tenaga surya. *Prosiding Seminar Nasional Teknologi Elektro Terapan*, vol 2, no. 1, pp. 159-163.
- [11] Rahardja, L. P. S., Eviningsih, R. P., Ferdiansyah, I., & Yanaratri, D. S. (2019). Perancangan dan implementasi DC-DC *bidirectional converter* dengan sumber energi listrik dari panel surya dan baterai untuk pemenuhan kebutuhan daya listrik beban. *Jurnal Teknologi Terpadu*, vol 7, no. 2, pp. 111-118.
- [12] Warjono, S., & Suryono. (2015). Rancang bangun *uninterruptible power supply* (UPS) 1300 VA. *Orbith*, vol. 11, no. 3, pp. 209-213.
- [13] Hamid, N. F. A., Jalil, M. A. A., & Mohamed, N. S. S. (2019). Design and simulation of single phase inverter using SPWM unipolar technique. *Journal of Physics: Conference Series, First International Conference on Emerging Electrical Energy, Electronics and Computing Technologies 2019 30–31 October 2019, Melaka, Malaysia*, vol. 1432, pp. 1-9.
- [14] Samman, F. A., Ahmad, R., & Mustafa, M. (2015). Perancangan, simulasi dan analisis harmonisa rangkaian inverter satu fasa. *JNTETI: Jurnal Nasional Teknik Elektro dan Teknologi Informasi*, vol. 4, no. 1, pp. 62-71.
- [15] Jamlay, M., & Faizal, W. M. (2014). *Dual feedback control* DC-DC *boost converter* menggunakan *PI controller*. *Inovtek*, vol. 4, no. 2, pp. 91-97.
- [16] Husnaini, I., & Krismadinata. (2017). Komparasi pengendali PI dan PID untuk tegangan keluaran konverter *buck*. *Jurnal Nasional Teknik Elektro*, vol 6, no. 3, pp. 143-151.
- [17] Marpaung, N. L., & Ervianto, E. (2018). Analisis pengendalian ATS untuk beban kategori 2E pada puskesmas rawat inap berbasis ATMEGA16. *Jurnal INAJEEE*, vol, 1, no. 1, pp. 30-37.