



DESIGN AND IMPLEMENTATION OF ANTI-WINDUP PI CONTROL ON DC-DC BIDIRECTIONAL CONVERTER FOR HYBRID VEHICLE APPLICATIONS

PERANCANGAN DAN IMPLEMENTASI KENDALI PI ANTI-WINDUP PADA KONVERTER DC-DC DUA ARAH UNTUK APLIKASI KENDARAAN HIBRID

Muh. Zakiyullah Romdlony^a, Amin^{a,b,*}

^a Sekolah Teknik Elektro dan Informatika, Institut Teknologi Bandung
Jl. Ganesha 10, Bandung, Jawa Barat 40132, Indonesia

^b Pusat Penelitian Tenaga Listrik dan Mekatronik – LIPI
Komp. LIPI Bandung, Jl. Sangkuriang, Gd. 10, Lt. dasar, Bandung, Jawa Barat 40135, Indonesia

Received 10 May 2012; received in revised form 11 July 2012; accepted 12 July 2012

Published online 31 July 2012

Abstract

Well-regulated DC bus voltage is the important point to guarantee power demand fulfillment in hybrid vehicle applications. Voltage regulation can be achieved with control method that determines switching signal on DC-DC converter. This paper describes the design and small scale experiment results of bus voltage regulation control for DC-DC bidirectional converter with battery and supercapacitor as energy sources. The control system consisted of two control loops. The outer loop got DC bus voltage feedback using anti-windup PI back calculation control method. This outer loop would generate a reference current for the inner loop that implemented hysteresis control. The inner control loop compared that reference current with the source current obtained from the current sensor. Simulation and experiment results showed that bus voltage was well-regulated under the load changes of 1% ripple voltage.

Key words: anti-windup PI, hysteresis, DC-DC bidirectional converter

Abstrak

Tegangan DC bus yang teregulasi dengan baik merupakan hal yang sangat penting pada aplikasi kendaraan hibrid, karena menjamin terpenuhi permintaan daya beban. Regulasi tegangan dapat dicapai dengan menerapkan metode kendali tertentu yang akan menentukan sinyal penyaklaran pada konverter DC-DC. Paper ini menjelaskan perancangan dan hasil eksperimen kendali regulasi tegangan bus pada konverter DC-DC dua arah (bidirectional converter) untuk skala kecil, dengan sumber berupa baterai dan superkapasitor. Sistem kendali terdiri dari dua buah loop kendali. Loop kendali luar mendapatkan umpan balik dari tegangan bus menerapkan metoda anti-windup PI back calculation. Pengendali ini akan menghasilkan arus referensi untuk loop kendali dalam yang menerapkan kendali hysteresis. Loop kendali dalam membandingkan arus referensi tersebut dengan arus sumber yang diperoleh dari bacaan sensor arus. Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa tegangan bus teregulasi dengan baik ketika terjadi perubahan beban dengan riak tegangan sekitar 1%.

Kata kunci: anti-windup PI, hysteresis, konverter DC-DC dua arah.

I. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan energi terus meningkat seiring berjalannya waktu. Bahan bakar minyak masih menjadi pilihan utama bagi kebanyakan orang. Pertumbuhan jumlah kendaraan yang sangat pesat tidak sebanding dengan jumlah bahan bakar minyak yang tersedia. Jumlah

kendaraan di dunia yang mencapai ratusan juta unit merupakan konsumen bahan bakar minyak terbesar yang membakar ratusan milyar galon bahan bakar tiap tahunnya. Selain faktor ketersediaan bahan bakar minyak yang terbatas, faktor lingkungan juga menjadi isu yang sangat krusial. Penggunaan bahan bakar minyak dapat menimbulkan polusi berupa gas buang CO₂ dan gas CO yang berbahaya bagi manusia, dan juga dapat merusak lapisan ozon.

* Corresponding Author. Tel: +62-22-2503055

E-mail: amin_hwi@yahoo.co.id

Penelitian dalam bidang energi hibrid untuk aplikasi kendaraan telah banyak dilakukan [1-6]. Beberapa penelitian menggunakan baterai sebagai sumber energi utama dan dilakukan hibridisasi dengan penyimpan energi berupa superkapasitor [2], sedangkan lainnya menggunakan sel bahan bakar (*fuel cell*) sebagai sumber energi utama dan melakukan hibridisasi dengan baterai atau superkapasitor, atau keduanya [1,6].

Pada prakteknya, nilai nominal tegangan DC dari sumber atau penyimpan energi tidak selalu sesuai dengan tegangan bus untuk aplikasi kendaraan hibrid yang secara umum memiliki standar 42 V [1,2,3]. Oleh karena itu perlu penambahan rangkaian elektronika daya berupa konverter DC-DC untuk menyesuaikan.

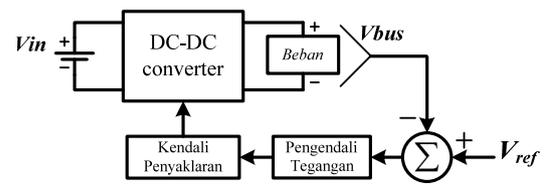
Tipe konverter DC-DC yang cocok digunakan adalah konverter DC-DC dua arah (*bidirectional converter*) atau sering dikenal dengan *buck-boost converter*. Hal ini terjadi karena pada konverter tipe tersebut, arus dapat mengalir dua arah, dari arah sumber menuju beban, dan dari arah beban menuju sumber, sehingga ada mode *discharging* ketika daya mengalir dari sumber atau penyimpan energi ke beban, dan mode *charging* ketika daya mengalir dari beban ke penyimpan energi untuk mendapatkan energi regeneratif pada saat kendaraan hibrid melakukan pengereman atau perlambatan. Selain itu, untuk menjamin permintaan daya beban terpenuhi, tegangan DC keluaran konverter DC-DC tersebut harus teregulasi dengan baik jika ada perubahan beban yang mendadak. Regulasi tegangan dapat dilakukan dengan menerapkan metode kendali tertentu yang akan menghasilkan sinyal penyaklaran.

Pada makalah ini, kami menerapkan rancangan dua metode kendali yaitu PI *anti-windup* pada *loop* kendali luar, dan histeresis pada *loop* kendali dalam.

Perancangan kendali disimulasikan dengan Matlab dan divalidasi dengan eksperimen skala kecil, dengan tegangan DC bus ditentukan sebesar 12 V. Sumber energi yang digunakan berupa baterai 6 V dan superkapasitor dengan tegangan nominal 7,5 V.

II. KENDALI DC-DC BIDIRECTIONAL CONVERTER

Penggunaan konverter DC-DC diharapkan dapat menghasilkan tegangan keluaran yang tetap (sebagai regulator tegangan) sekalipun terdapat perubahan pada beban maupun pada sumber. Ketika tegangan turun akibat beban berlebih, maka kendali pada konverter akan memberikan perintah pada sistem kendalinya untuk segera



Gambar 1. Kendali konverter dengan *direct duty cycle*.

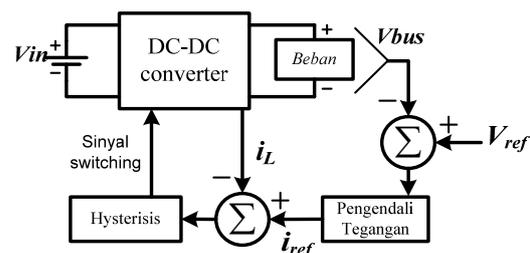
menaikkan tegangan keluarannya. Begitu pula sebaliknya ketika terjadi beban nol dan tegangan menjadi terlalu besar, maka kendali pada konverter akan dengan segera menurunkan tegangan. Oleh karena itu jarang digunakan suatu kendali terbuka dimana tidak ada umpan balik dari konverter [7].

Salah satu teknik kendali yang telah umum adalah dengan teknik kendali faktor kerja secara langsung (*direct duty cycle*) seperti terlihat pada Gambar 1. Tegangan keluaran diumpanbalikkan dan dibandingkan dengan tegangan acuan setiap saatnya untuk dihasilkan galat (*error*) tegangan. Sinyal galat ini kemudian diolah oleh pengendali sehingga dihasilkan sinyal PWM yang sesuai. Metode kendali ini rentan terhadap gangguan karena respon lambat terhadap gangguan akibat perubahan *input*. Selain itu, pengendali ini tidak mampu membatasi arus berlebih yang dapat terjadi [7].

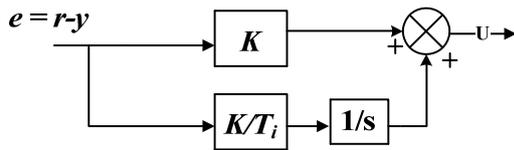
Metode kendali yang umum digunakan adalah penggunaan sebuah pengendali tegangan untuk menghasilkan arus referensi dan kemudian sebuah pengendali arus untuk menghasilkan sinyal penyaklaran (Gambar 2). Dengan skema seperti ini arus referensi yang dihasilkan oleh pengendali tegangan dapat dibatasi dan juga berarti membatasi arus pada konverter. Oleh karena itu, dengan pengendalian ini maka tegangan keluaran konverter dapat dikendalikan tanpa mengalami kelebihan arus.

A. Kendali PI Anti-windup

Pengendali tegangan yang umum digunakan adalah pengendali PI (*Proportional Integral*). Pengendali ini berfungsi untuk mempercepat respon transien dan juga untuk memperbaiki galat keadaan tunak (*steady state error*).



Gambar 2. Kendali konverter dengan penggunaan pengendali arus histeresis.

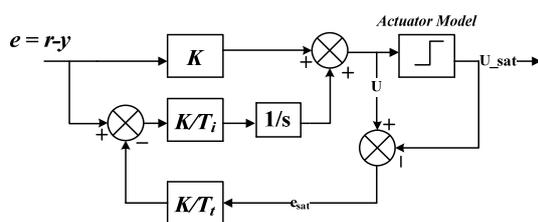


Gambar 3. Diagram blok pengendali PI.

Secara umum komponen proporsional akan membuat respon sistem memiliki transien yang lebih cepat tetapi dapat menyebabkan sistem memasuki daerah osilasi bahkan daerah tidak stabil. Nilai K dipilih dalam batas kestabilan sistem dan juga dalam pertimbangan implementasi pengendali. Komponen integral memegang peranan dalam memperbaiki respon galat keadaan tunak. Penambahan komponen integral yang terlalu besar akan mengakibatkan sistem cenderung mengalami osilasi. Komponen integral akan menambah kutub pada sistem yaitu pada titik pusat. Komponen integral ditunjukkan dengan konstanta waktu integrasi yaitu T_i . Semakin kecil nilai T_i maka akan semakin cepat proses integral dilaksanakan. Diagram blok pengendali PI ditunjukkan pada Gambar 3 [8].

Dalam penggunaan pengendali PI akan ditemukan hasil sinyal kendali U yang terlalu besar. Hal ini biasanya terjadi ketika nilai dari T_i terlalu kecil dan sinyal kendali menjadi membesar secara drastis. Sistem yang dikendalikan akan memiliki aktuatur tertentu. Aktuatur ini sendiri memiliki model dan batasan tersendiri dalam menerima sinyal kendali. Sinyal kendali yang terlalu besar akan mengakibatkan kerusakan aktuatur, sehingga untuk menghindari hal tersebut maka digunakan suatu penambahan komponen pada komponen integral yang dikenal dengan nama *anti-windup* [8].

Anti-windup adalah algoritma penggunaan pengendali PI yang memperhitungkan batasan saturasi dan model dari aktuatur. Secara umum metode ini memiliki diagram blok seperti pada Gambar 4. Metode ini menggunakan sebuah aktuatur model yang memiliki karakteristik linear maupun nonlinear dengan batasan u_{min} dan u_{max} . Hal ini akan memberikan umpan balik pada pengendali integral sehingga pengendali integral akan mengurangi besarnya sinyal hasil integrasi.

Gambar 4. Pengendali PI dengan *anti-windup*.

Pengurangan besar galat yang diintegrasikan ini merupakan besaran selisih antara sinyal kendali hasil PI dan sinyal keluaran saturasi. Jika sinyal keluaran PI melebihi saturasi maka sinyal ini akan dikalikan dengan suatu konstanta waktu T_t yang akan memberikan umpan balik ke pengendali integral. Penentuan nilai T_t ini dipengaruhi oleh besarnya sinyal hasil keluaran PI yang diturunkan per satuan waktunya. Dengan mendefinisikan:

$$K_i = \frac{K}{T_i}; \text{ dan } K_t = \frac{K}{T_t}; \quad (1)$$

penentuan nilai T_t ini dapat diturunkan dari persamaan berikut dengan mengasumsikan x adalah nilai keluaran integrator [9]:

$$\frac{dx}{dt} = K_i \cdot e - K_t \cdot (u - u_{max}) \quad (2)$$

$$y = x + K \cdot e \quad (3)$$

$$\frac{dx}{dt} = -K_i \cdot K_t + K_i \cdot (1 - K_t \cdot K) \cdot e + K_i \cdot K_t \cdot u_{max} \quad (4)$$

solusi persamaan (4) yang merupakan persamaan differensial pada nilai galat konstan adalah seperti persamaan (5) sampai (7):

$$x(t) = \left(x_0 - \frac{e}{K_t} - u_{max} + K \cdot e \right) \cdot e^{-K_i \cdot K_t \cdot t} + \left(\frac{e}{K_t} + u_{max} - K \cdot e \right) \quad (5)$$

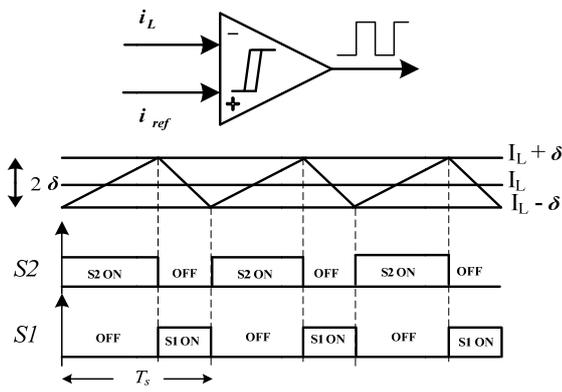
$$u(t) = \left(x_0 - \frac{e}{K_t} - y_{max} + K \cdot e \right) \cdot e^{-K_i \cdot K_t \cdot t} + \left(\frac{e}{K_t} + u_{max} \right) \quad (6)$$

$$u_{ss} = u_{max} + \frac{e}{K_t} \quad (7)$$

nilai x_0 adalah nilai kondisi awal x , u_{max} adalah nilai maksimum sinyal kendali yang boleh diberikan. Jika dilihat dari persamaan diatas maka nilai u akan menuju nilai keadaan tunak. Jika nilai K_t semakin besar maka nilai tunak dari sinyal kendali akan semakin cepat dicapai.

B. Kendali Histeresis

Untuk pengendali arus digunakan kendali histeresis karena kesederhanaan dan kemampuan pengendali ini. Kendali arus dengan menggunakan histeresis ini memanfaatkan lebar sebuah pita histeresis dimana lebar pita ini merupakan batas atas dan bawah dari besarnya galat yang diperbolehkan. Jika arus induktor naik dari batas bawah pita histeresis hingga batas atas maka saklar akan dimatikan dan jika arus ini turun dari batas atas menuju batas bawah maka saklar akan dinyalakan. Hal ini berlaku untuk arus induktor yang positif sedangkan jika negatif hal berkebalikannya yang berlaku.



Gambar 5. Kendali arus dengan pita histeresis

Cara kerja pengendali arus histeresis ini dapat dilihat pada Gambar 5. Dengan i_L adalah arus induktor, yang tidak lain adalah arus sumber, δ adalah lebar pita histeresis, dan i_{ref} adalah arus referensi yang dihasilkan oleh pengendali PI *anti-windup*. Pada aplikasi histeresis ini, arus induktor diperoleh dari persamaan hubungan antara riak (*ripple*) arus induktor dengan lebar pita histeresis. Berikut ini adalah persamaan yang berlaku.

$$\bar{i}_L \pm \tilde{i}_L = i_{ref} \pm \delta \quad (8)$$

nilai lebar setengah pita histeresis ini sama dengan besarnya setengah riak arus induktor. Oleh karena itu dalam menentukan lebar pita histeresis perlu ditentukan besarnya riak arus induktor yang diizinkan. Hubungan antara lebar pita histeresis dan frekuensi penyaklaran dapat diturunkan dari hubungan arus induktor dengan penyalaan saklar seperti persamaan (9).

$$i_L = \frac{1}{L} \cdot \int_0^{T_{ON}} (v_s - v_o) + i_{L0} \quad (9)$$

dengan i_{L0} merupakan arus induktor pada keadaan mula. Saat saklar S1 menyala, berlaku

$$i_L = \frac{v_s - v_o}{L} \cdot t + (\bar{i}_L - \delta); 0 < t < T_{ON}$$

$$T_{ON} = \frac{2\delta L}{v_s - v_o} \quad (10)$$

dengan T_{ON} adalah lama waktu saklar menyala.

Pada saat kondisi saklar S1 padam, arus induktornya memenuhi persamaan

$$i_L = \frac{v_s}{L} \cdot t + (\bar{i}_L + \delta); T_{ON} < t < T_{OFF}$$

$$T_{OFF} = \frac{2\delta L}{v_s} \quad (11)$$

dengan T_{OFF} adalah lama waktu saklar padam. Dari dua persamaan di atas yaitu Persamaan (10) dan (11), dapat memperoleh periode penyaklaran T_s sebesar

$$T_s = T_{ON} + T_{OFF} = \frac{2v_o \delta L}{v_s(v_o - v_s)}$$

$$f_s = \frac{v_s(v_o - v_s)}{2v_o \delta L} \quad (12)$$

persamaan di atas memperlihatkan bahwa frekuensi penyaklaran f_s pada konverter dengan menggunakan kendali arus histeresis ditentukan oleh besarnya nilai induktor dan lebar pita histeresis yang digunakan. Semakin besar nilai induktor dan semakin lebar pita histeresis yang digunakan, maka frekuensi penyaklaran akan semakin kecil.

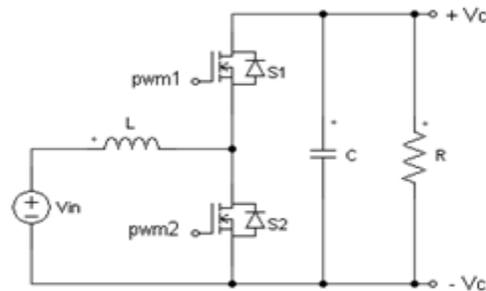
Nilai frekuensi penyaklaran ini memegang peranan penting pada riak arus dan tegangan konverter. Nilai ini juga berpengaruh pada besarnya rugi-rugi saklar akibat penyaklaran. Respon pengendali arus ini harus lebih cepat dari respon pengendali tegangan untuk memperoleh hasil pengendali yang tepat.

III. DESAIN DAN SIMULASI DC-DC BIDIRECTIONAL CONVERTER

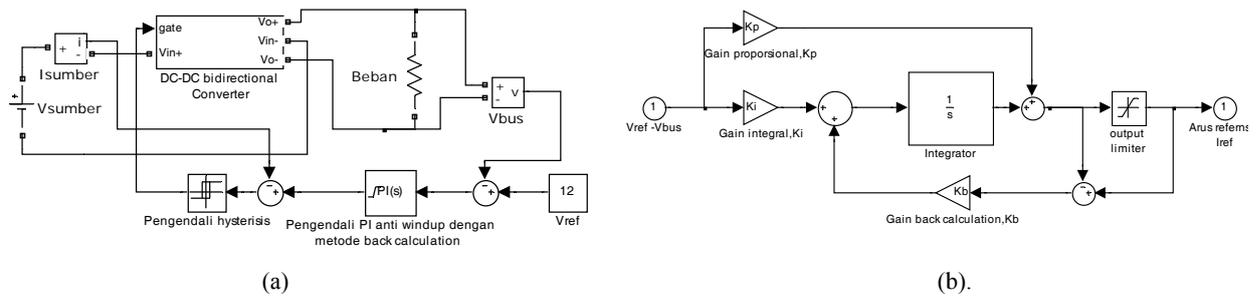
A. Desain Konverter DC-DC Dua Arah

Rangkaian konverter DC-DC dua arah diperlihatkan pada Gambar 6. Pada konverter DC-DC dua arah terdapat komponen saklar transistor daya yang akan mengubah mode kerja konverter. Saklar tersebut dapat berupa MOSFET atau IGBT. Dalam eksperimen yang kami lakukan, saklar yang digunakan adalah tipe MOSFET dengan pertimbangan rating daya dan kecepatan penyaklaran (*switching*).

Saklar MOSFET tersebut akan di-*drive* oleh sinyal penyaklaran yang berasal dari algoritma kendali yang diterapkan melalui suatu rangkaian MOSFET *driver*. Sistem kendali yang kami ajukan, terdiri dari dua buah *loop* kendali, *loop* kendali luar menerapkan metoda PI *anti-windup* yang mendapatkan umpan balik dari tegangan bus. Pengendali ini akan menghasilkan arus referensi untuk *loop* kendali dalam. *Loop* kendali dalam akan membandingkan arus referensi tersebut dengan arus sumber yang diperoleh dari bacaan sensor arus. Galat arus ini akan diubah menjadi sinyal penyaklaran dengan menerapkan kendali histeresis sesuai dengan Gambar 2.



Gambar 6. Rangkaian konverter DC-DC dua arah.



Gambar 7. Rangkaian simulasi konverter DC-DC dua arah (a), pengendali PI *anti-windup* (b).

Persamaan *state space* untuk model *averagenya* adalah sebagai berikut [5,10]

$$\begin{pmatrix} \frac{di_L}{dt} \\ \frac{dV_C}{dt} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & \frac{1-d}{L} \\ -\frac{(1-d)}{C} & -\frac{1}{RC} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_L \\ V_C \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} V_{in} \quad (13)$$

nilai parameter yang digunakan pada konverter DC-DC dua arah diperlihatkan pada Tabel 1.

B. Simulasi Konverter DC-DC Dua Arah

Sebelum dilakukan eksperimen, simulasi dilakukan terlebih dahulu untuk mendapatkan nilai parameter kendali (K_p dan K_i) yang optimal. Dari hasil simulasi dan *tuning* parameter kendali, didapatkan nilai K_p sebesar 25 dan nilai K_i sebesar 90 agar didapatkan tegangan bus yang konstan meskipun terjadi perubahan beban.

Selain itu, metode *anti-windup* yang diterapkan adalah metode *back calculation* dengan penguatan K_b ditentukan sebesar 2, dengan batas atas dan bawah sinyal kendali dibatasi masing-masing 4 A dan 0 A. Kendali *loop* dalam menerapkan kendali histeresis dengan batas pita histeresis adalah dari -0,1A sampai dengan 0,1 A. Keluaran kendali histeresis ini adalah berupa sinyal penyaklaran MOSFET untuk konverter DC-DC dua arah. Pada Gambar 7 diperlihatkan rangkaian *Simulink* yang digunakan untuk simulasi dan hasil simulasi diperlihatkan pada Gambar 8.

Pada hasil simulasi pada Gambar 8, terlihat bahwa tegangan bus cukup teregulasi dengan baik di sekitar 12 V sesuai dengan tegangan referensinya meskipun terjadi perubahan beban dari 11 ohm menjadi 6,3 ohm pada saat detik ke

0,5 kemudian kembali menjadi 11 ohm lagi pada detik ke 1. Perubahan beban ini menyebabkan nilai arus yang diminta beban menjadi sekitar 1,9 A. Sementara itu, untuk analisis riak tegangan, pada saat arus beban 1 A diperoleh riak tegangan sekitar 1,25%, sedangkan ketika arus beban dinaikkan, riak tegangannya berkurang menjadi sekitar 0,7%.

IV. DESAIN DAN HASIL EKSPERIMEN

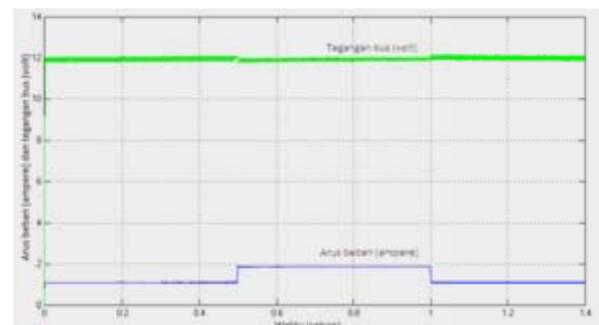
A. Desain Eksperimen

Pengendali PI *anti-windup* yang diusulkan diimplementasikan pada *platform* dSPACE yang merupakan integrasi antara perangkat keras DSP dengan perangkat lunak MATLAB/*Simulink*. dSPACE *controller board* ini diintegrasikan pada *motherboard* PC dan menjadi pengendali utama untuk mengendalikan konverter DC-DC. Modul DSP yang digunakan adalah DS1104 yang memiliki prosesor bertipe MPC8240 dengan *clock* 250 MHz serta memiliki prosesor DSP tambahan bertipe TMS320F240. Berikut ini adalah spesifikasi dari dSPACE DS1104 *controller board* :

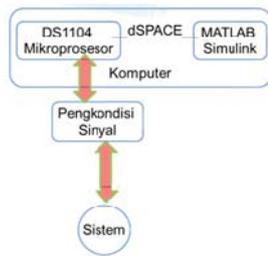
- *Processor* tipe MPC8240 dengan *clock* 250 MHz dan *slave* DSP tipe TMS320F240
- *Global Memory* 32 MB
- *Flash Memory* 8 MB
- 20 bit digital I/O dan 14 bit digital I/O pada *slave* DSP
- 4 ADC 16 bit dan 4 ADC 12 bit.
- 8 DAC 16 bit

Tabel 1
Parameter konverter DC-DC dua arah.

Parameter	Nilai
Riak arus	5%
Riak tegangan	1%
Vref	12 V
L	400 μ H
C	2000 μ F
Fs	25 KHz



Gambar 8. Hasil simulasi konverter DC-DC dua arah, tegangan bus (atas, hijau), arus beban (bawah, biru).

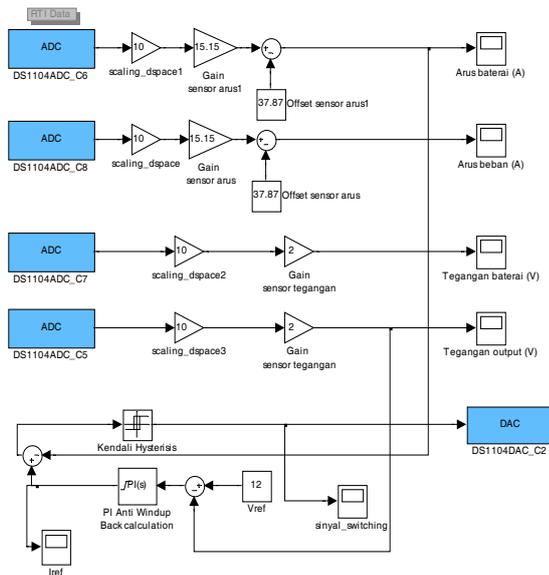


Gambar 9. Diagram blok implementasi sistem.

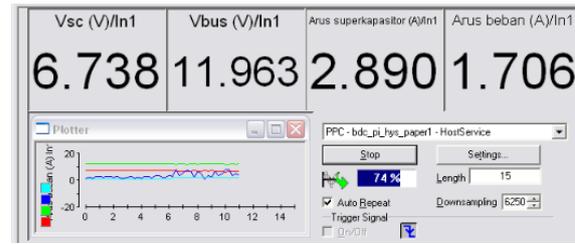
Sistem perangkat lunak dSPACE ini memberikan kemudahan implementasi sistem kendali karena hanya menggunakan bantuan MATLAB/Simulink tanpa harus melakukan proses pengkodean program secara manual (misalnya bahasa C) seperti layaknya modul DSP biasa.

Parameter-parameter dari sistem seperti tegangan/arus akan dibaca oleh konverter analog ke digital (ADC) pada DS1104 controller board melalui rangkaian pengkondisi sinyal (*signal conditioning*). Fungsi dari rangkaian pengkondisi sinyal ini adalah mengubah level tegangan/arus dari sistem agar sesuai dengan *range input* yang diijinkan oleh DS1104 controller board. Proses perhitungan dari algoritma kendali akan dilakukan oleh DS1104 controller board dan akan menghasilkan sinyal penyaklaran. Sinyal penyaklaran yang dihasilkan akan mengatur konverter DC-DC dua arah melalui pengkondisi sinyal dan *driver* MOSFET. Secara lengkap diagram blok implementasi sistem diperlihatkan pada Gambar 9.

Algoritma kendali yang telah dirancang diuji dengan eksperimen. Parameter kendali PI yang digunakan dalam eksperimen sama dengan parameter yang digunakan dalam simulasi. Parameter ini dapat di-tuning secara *online*



Gambar 10. Diagram simulink untuk implementasi PI anti-windup pada dSPACE real time controller.



Gambar 11. GUI implementasi PI anti-windup.

dengan mengaturnya pada GUI *realtime* yang telah dibuat. Akan tetapi untuk alasan keamanan, *tuning* parameter tidak dilakukan secara *online*. Gambar 10 adalah diagram *simulink* yang diimplementasikan pada dSPACE Controller board. Seluruh proses perhitungan dan pengendalian sistem dilakukan secara *real-time* dan ditampilkan dalam antarmuka pada ControlDesk-dSPACE (Gambar 11).

ControlDesk-dSPACE dapat digunakan untuk mengamati semua parameter-parameter dari sistem seperti tegangan dan arus baterai/superkapasitor, arus beban serta tegangan bus secara *real-time* melalui layar monitor komputer (Gambar 12).

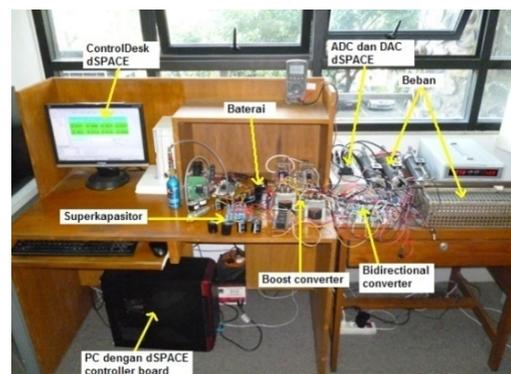
B. Hasil Eksperimen

Sumber energi yang digunakan dalam eksperimen adalah baterai dan superkapasitor, sesuai dengan sumber energi yang biasa digunakan dalam aplikasi kendaraan hibrid.

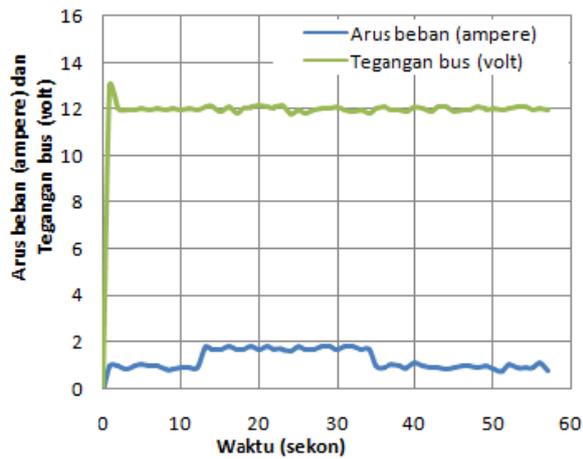
Pengujian dilakukan dua kali, pertama pengujian konverter DC-DC dua arah dengan sumber berupa baterai. Pengujian selanjutnya dilakukan dengan sumber berupa superkapasitor. Spesifikasi sumber energi yang digunakan untuk eksperimen diperlihatkan pada Tabel 2.

Tabel 2
Spesifikasi sumber energi.

Sumber energi	Spesifikasi	Jumlah dan konfigurasi
Baterai	6V, 4.5 Ah	1 buah
Superkapasitor	7.5V, 120 F	9 buah superkapasitor 2.5 V, 120 F (konfigurasi seri dan paralel)



Gambar 12. Test bench eksperimen.

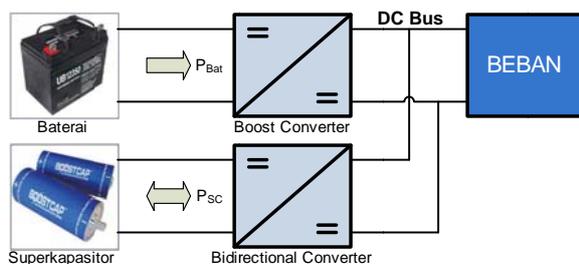


Gambar 13. Hasil eksperimen konverter DC-DC dua arah dengan sumber baterai.

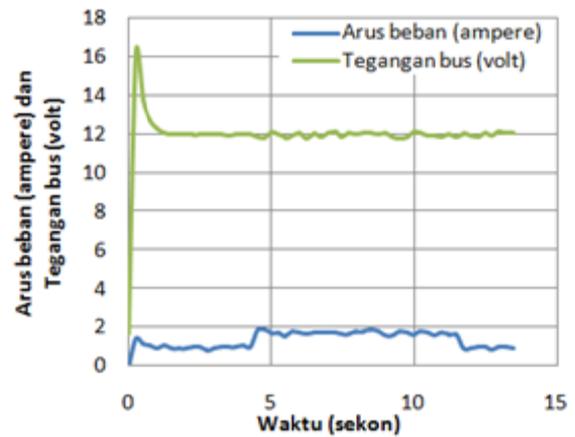
Tegangan bus referensi yang diterapkan pada eksperimen adalah 12 V. Parameter pengendali yang diterapkan pada tahap eksperimen sama dengan parameter pengendali pada tahap simulasi. Tegangan bus dan arus beban dibaca masing-masing melalui sensor tegangan dan sensor arus dan diakuisisi oleh ADC dSPACE. Hasil ini kemudian di *log*, dan diplot dengan bantuan perangkat lunak *ControlDesk*.

Pada hasil eksperimen (Gambar 13 dan Gambar 14) terlihat bahwa untuk sumber energi berupa baterai terjadi *overshoot* sekitar 9% sedangkan untuk superkapasitor terjadi *overshoot* sebesar 38%. Perubahan beban pada konverter terjadi pada detik ke 12 dan detik ke 35 dengan cara mengubah resistansi beban dari 11 ohm menjadi 6,2 ohm, kemudian menjadi 11 ohm lagi. Sedangkan pada konverter dengan sumber berupa superkapasitor, perubahan beban terjadi pada detik ke 4 dan detik ke 12.

Berdasarkan Gambar 13 dan Gambar 14 tersebut dapat disimpulkan bahwa untuk perubahan beban, tegangan bus teregulasi dengan baik sesuai dengan tegangan referensi yaitu 12 V, dengan riak tegangan sekitar 1% baik untuk sumber energi baterai maupun superkapasitor.



Gambar 15. Diagram blok pengujian bidireksionalitas konverter DC-DC.



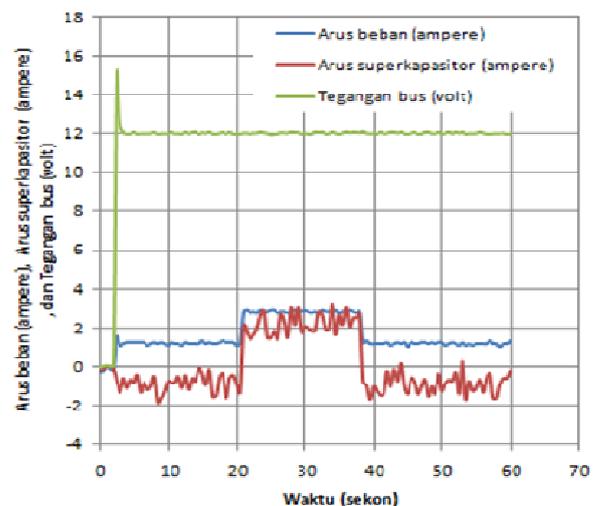
Gambar 14. Hasil eksperimen konverter DC-DC dua arah dengan sumber superkapasitor.

C. Pengujian bidireksionalitas

Pengujian konverter secara dua arah (*charge* dan *discharge*) dilakukan dengan cara memparalelkan dua sumber energi seperti pada Gambar 15. Pengujian dilakukan dengan cara memberikan arus referensi yang konstan pada baterai dan dilakukan perubahan beban dari 11 ohm menjadi 4,3 ohm sehingga terlihat arah arus superkapasitor (*charging* atau *discharging*). Hasil pengujian bidireksionalitas konverter DC-DC diperlihatkan pada Gambar 16.

Pada Gambar 16 terlihat bahwa pada saat beban 11 ohm maka baterai menyuplai beban dan superkapasitor (*superkapasitor charging*) dan pada saat beban menjadi 4,3 ohm (detik ke 21) maka superkapasitor menjadi *discharging* untuk menjaga tegangan bus tetap pada referensinya.

Dari hasil eksperimen terlihat bahwa tegangan bus teregulasi dengan baik dengan riak sebesar 0,7 % dan *overshoot* sebesar 24,87%.



Gambar 16. Hasil pengujian bidireksionalitas konverter DC-DC.

V. KESIMPULAN

Hasil simulasi dan eksperimen menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode kendali PI *anti-windup*, tegangan bus teregulasi dengan baik dengan riak tegangan sekitar 1% meskipun terjadi perubahan beban maupun perubahan tegangan sumber. Hal ini berarti permintaan daya beban dapat terpenuhi dengan baik.

Untuk aplikasi daya besar seperti pada kendaraan hibrid, metode kendali ini dapat diaplikasikan dengan melakukan penyesuaian terutama pada spesifikasi *hardware (DC-DC converter)* yang digunakan.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis ingin mengucapkan terimakasih kepada tim hybrid fuel cell Sekolah Teknik Elektro dan Informatika ITB dan juga Kementerian Riset dan Teknologi atas pembiayaan yang diberikan untuk riset ini.

REFERENSI

- [1] Thounthong, P., Sethakul, P., Raël, S., and Davat, B., "Control of Fuel Cell/Battery/Supercapacitor Hybrid Source for Vehicle Applications", *Proceedings of the 2009 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 2009, pp.1-6.
- [2] Thounthong, P., Chunkag, V., Sethakul, P., Davat, B., "Comparative Study of Fuel Cell Vehicle Hybridization with Battery or Supercapacitor Storage Device", *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 58, pp. 3892-3904, 2009.
- [3] O. Tremblay, "A Generic Battery Model For The Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicle", *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2007*, pp. 284-289, 2007.
- [4] Bizon N., "Some Aspects on Control of Fuel Cell Hybrid Source at The Fuel Cell Maximum Power Point under Dynamic Load", *IJTPE journal*, 2, pp. 63-68, 2010.
- [5] Hajizadeh, A., Aliakbar Golkar M., "Intelligent power management strategy of hybrid distributed generation system", *International Journal of Electrical Power & Energy System*, 29, pp. 783-795, 2007.
- [6] Souleman N.M., "A generic fuel cell model and experimental validation", Master thesis, Ecole De Technologie Superieure Universite Du Quebec, 2008.
- [7] Sasongko, Firman, "Teknik Kendali Konverter DC-DC topologi baru mode boost", Laporan Tugas Akhir Institut Teknologi Bandung, 2008.
- [8] Astrom, Karl Johan, "Control Sistem Design", Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, Sweden, 2002.
- [9] John, Anirban Ghoshal, and Vinod, "Anti-windup Schemes for Proportional Integral and Proportional Resonant Controller", *National Power Electronic Conference*, 2010, pp. 1-6.
- [10] Hajizadeh A, Aliakbar Golkar M., "Fuzzy control of fuel cell distributed generation systems", *Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering*, 13, pp. 31-41, 2007.