

Desain dan Simulasi Konverter Boost Multilevel sebagai Catu Daya Kendaraan Listrik

Akhmad Zaky Fanani, Mochamad Ashari¹⁾, Teguh Yuwono²⁾

Jurusan Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Industri, Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS)

Jl. Arief Rahman Hakim, Surabaya 60111 Indonesia

e-mail: zaky11@mhs.ee.its.ac.id, ashari@ee.its.ac.id¹⁾, teguh@ee.its.ac.id²⁾

Abstrak—Konverter boost multilevel merupakan jenis dc-dc konverter yang dapat menaikkan tegangan output. Prinsip kerja konverter ini sama dengan konverter boost konvensional akan tetapi memiliki keuntungan yaitu besar ratio tegangan output yang lebih tinggi. Keuntungan ini dapat diterapkan pada motor listrik sebagai pengendali catu daya. Konverter boost multilevel berfungsi untuk menaikkan tegangan dari baterai ke motor. Pada tugas akhir ini dibahas desain dan simulasi konverter boost dengan dua induktor yang dilengkapi dengan transformator tambahan dan konverter boost multilevel menggunakan kapasitor yang di-cascade 3 tingkat. Simulasi yang dilakukan pada tugas akhir ini adalah penerapan konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi dengan transformator tambahan dan konverter boost multilevel yang diberi beban berupa motor dc. Dari hasil simulasi diamati karakteristik tegangan output pada konverter-konverter boost tersebut sehingga dapat ditentukan jenis konverter boost yang tepat untuk catu daya kendaraan listrik.

Kata Kunci—Konverter Boost, Konverter Boost Multilevel, Konverter Boost Dengan Dua Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan, Motor DC.

I. PENDAHULUAN

PERTUMBUHAN jumlah kendaraan bermotor yang semakin meningkat dengan merk-merk yang semakin banyak akan meningkatkan konsumsi bahan bakar minyak (BBM) dan pencemaran udara di Indonesia. Minyak bumi ini adalah sumber energi yang tak dapat diperbaharui. Jika konsumsi BBM semakin meningkat, maka cadangan minyak bumi dalam negeri akan semakin berkurang. Sedikit yang membantah bahwa minyak bumi suatu saat akan habis dan manusia akan terpaksa beralih ke jenis energi lainnya. Yang menjadi masalah kini bukanlah apakah minyak akan habis, tetapi kapan minyak akan habis. Ini adalah yang kita sebut sebagai krisis minyak dunia

Untuk mengatasi hal tersebut maka diperlukan suatu penelitian untuk mencoba penggunaan motor listrik sebagai penggerak utama pada kendaraan listrik (electric vehicle) sebagai pengganti BBM. *Electric Vehicle* adalah sebuah kendaraan yang menggunakan tenaga listrik dalam pengoperasiannya. Di negara maju, *Electric Vehicle (EV)* sudah lazim digunakan sebagai alternatif pengganti kendaraan berbahan bakar minyak. *Electric Vehicle* menggunakan penggerak utama berupa motor listrik yang sumber energi dari baterai (aki).

Masalah yang sering timbul pada *Electric Vehicle* adalah besar nilai tegangan baterai lebih kecil dibandingkan dengan

tegangan pada motor listrik. Untuk mengatasi masalah ini, maka digunakan DC-DC konverter untuk menaikkan tegangan output baterai. Selain untuk menaikkan tegangan output baterai, sebuah DC-DC konverter juga diperlukan untuk meningkatkan efisiensi pengiriman daya. Salah satu konverter yang dapat digunakan adalah konverter boost multilevel. Sedangkan jenis DC-DC konverter lainnya adalah konverter boost dengan dua induktor yang dilengkapi transformator tambahan.

II. LANDASAN TEORI

A. Kendaraan Listrik

Kendaraan listrik merupakan suatu kendaraan yang menggunakan energi listrik sebagai sumber energi utama. Kendaraan listrik menggunakan motor listrik sebagai penggerakannya. Salah satu jenis motor listrik yang digunakan di kendaraan listrik adalah motor DC [1].

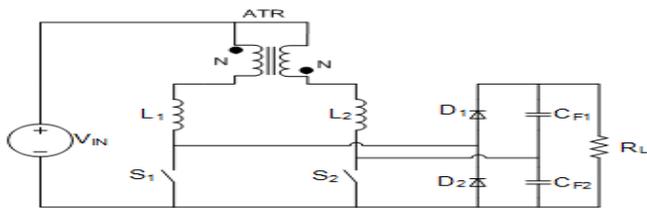
Keuntungan yang didapat dari kendaraan listrik adalah minimnya tingkat polusi yang dihasilkan oleh kendaraan, kerja mesin yang tidak bising dan ramah lingkungan [2]. Sekarang semakin banyak ilmuwan atau praktisi yang terus berusaha mengembangkan teknologi kendaraan listrik, karena kendaraan listrik memiliki potensi yang sangat besar sebagai pilihan utama kendaraan masyarakat, seiring dengan berkurangnya ketersediaan minyak di dunia..

B. Konverter Boost Dengan 2 Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan

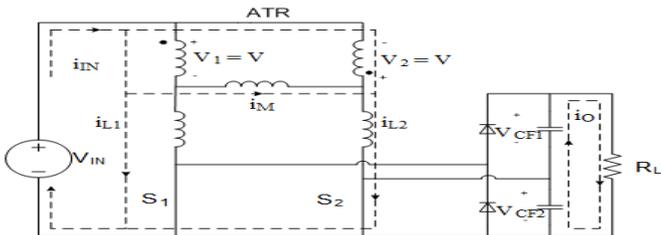
Konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan terdiri dari 2 switch (S_1 dan S_2), 2 induktor boost (L_1 dan L_2) dan 1 transformator pada sisi input. Sedangkan pada sisi output terdiri dari 2 dioda (D_1 dan D_2) dan 2 kapasitor (C_{F1} dan C_{F2}) yang terhubung langsung dengan beban R_L . Rangkaianannya ditunjukkan pada gambar 1[3].

Dalam rangkaian diatas, transformator tambahan mempunyai perbandingan lilitan 1:1. Kapasitor filter (C_{F1} dan C_{F2}) dianggap cukup besar sehingga besar nilai ripple tegangan yang melaluinya lebih kecil daripada tegangan DC nya.

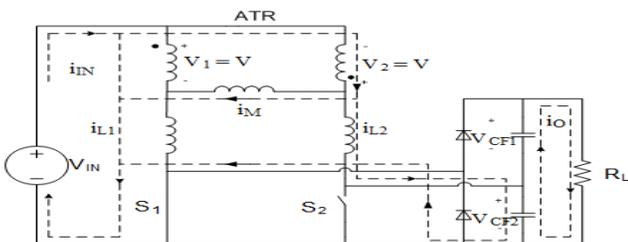
Dalam kurun waktu $T_0 - T_1$ (kedua switch dalam keadaan menyala), arus induktor I_{L1} dan I_{L2} dapat dihitung dari gambar 2 yang menunjukkan rangkaian ekuivalen dari konverter selama kurun waktu $T_0 - T_1$.



Gambar. 1. Rangkaian Konverter Boost Dengan 2 Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan



Gambar. 2. Rangkaian Ekuivalen Dari Konverter Selama Kurun Waktu $T_0 - T_1$



Gambar. 3. Rangkaian Ekuivalen Dari Konverter Selama Kurun Waktu $T_1 - T_2$

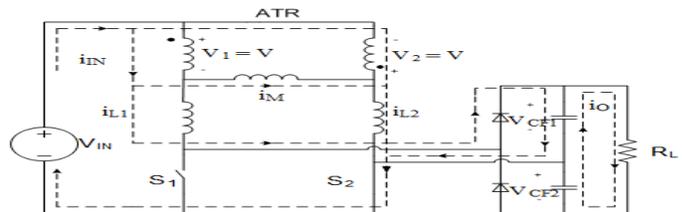
Output terpisah dari input ketika kedua switch menyala dan dioda (D_1 dan D_2) terbias mundur. Pada kurun waktu ini, arus beban disuplai oleh kapasitor filter (C_{F1} dan C_{F2}) dan tegangan kapasitor (V_{CF1} dan V_{CF2}) akan menurun dengan perlahan. Karena tegangan output (V_O) = $V_{CF1} + V_{CF2}$, maka besar nilai tegangan output akan berkurang secara perlahan.

Dalam kurun waktu $T_1 - T_2$, saat $t = T_1$ (Switch S_2 mati), arus induktor i_{L2} dialirkan dari switch ke dioda D_2 dan energi yang tersimpan di dalam induktor L_2 akan discharge ke filter kapasitor CF_2 . Rangkaian ekuivalen dari konverter selama kurun waktu $T_1 - T_2$ ditunjukkan pada gambar 3.

Pada kurun waktu ini, besar nilai tegangan kapasitor V_{CF2} mengalami kenaikan karena arus i_{L2} mengisi kapasitor CF_2 . Sedangkan tegangan kapasitor V_{CF1} mengalami penurunan karena kapasitor CF_1 terus menerus discharge ke arah beban.

Dalam kurun waktu $T_2 - T_3$, saat $t = T_2$ (switch S_2 nyala kembali), kedua switch nyala dan kedua arus induktor (i_{L1} dan i_{L2}) naik dengan besar nilai yang sama. Pada saat yang sama, kapasitor filter (CF_1 dan CF_2) mengalami discharge yang sebelumnya didahului oleh diode (D_1 dan D_2) yang terbias mundur. Skema rangkaian pada kurun waktu $T_2 - T_3$ sama dengan skema rangkaian dalam kurun waktu $T_0 - T_1$.

Pada tahap terakhir, dalam kurun waktu $T_3 - T_4$, saat $t = T_3$ (switch S_1 mati), arus induktor i_{L2} dialirkan dari switch ke dioda D_1 . Pada kondisi ini, energi yang tersimpan di dalam induktor L_1 dialirkan ke kapasitor CF_1 sehingga besar nilai tegangan V_{CF1} mengalami kenaikan dan besar nilai tegangan V_{CF2} mengalami penurunan. Hal ini terjadi karena kapasitor



Gambar. 4. Rangkaian Ekuivalen Dari Konverter Selama Kurun Waktu $T_3 - T_4$

CF_2 mengalami discharge ke beban. Gambar 4 menunjukkan rangkaian ekuivalen dari konverter selama kurun waktu $T_3 - T_4$.

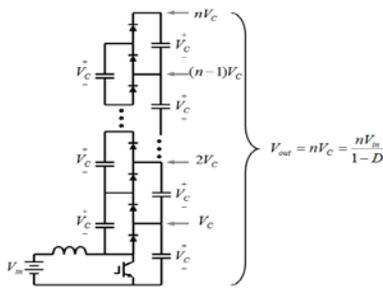
C. Konverter Boost Multilevel

Konverter boost multilevel adalah sebuah konverter DC - DC berbasis PWM yang mengkombinasikan antara konverter boost konvensional dan fungsi *switched capacitor* untuk menghasilkan tegangan output yang berbeda dan stabil dengan hanya menggunakan 1 *driven switch*, 1 induktor, $2N-1$ dioda dan $2N-1$ kapasitor [3]. N yang dimaksud adalah jumlah tingkat pada konverter boost multilevel. Kelebihan dari topologi ini adalah: arus inputnya kontinu, ratio konversinya besar walaupun tanpa menggunakan *duty cycle* yang besar dan tanpa menggunakan transformator tambahan, dan dapat menggunakan frekuensi *switching* yang tinggi. Konverter ini dapat dibangun dengan beberapa cara dan levelnya dapat ditambah tanpa memodifikasi/mengubah rangkaian utama.

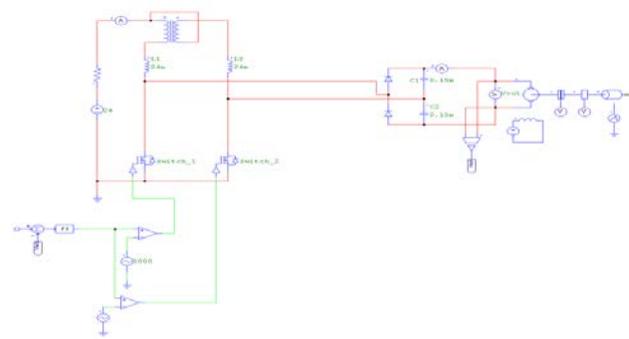
Rangkaian konverter boost multilevel ditunjukkan pada gambar 5. Bagian yang paling bawah adalah konverter boost konvensional. Jadi, besar nilai kenaikan tegangan berdasarkan pada persamaan konverter boost konvensional. Perbedaan antara konverter boost multilevel dan konverter boost konvensional adalah besar nilai tegangan output konverter boost multilevel didapatkan dari $V_c \times N$, dimana $N+1$ adalah jumlah level konverter yang dihitung dari level nol. Karakteristik ini dapat tercapai berkat pengalihan pada tegangan output konverter boost konvensional yang dikendalikan oleh hanya satu switch yang ada di dalam konverter.

Keadaan pada saat *switch on* ditunjukkan pada gambar 6. Saat *switch* dalam keadaan on, induktor akan terhubung ke tegangan input (V_{in}), (gambar 6a). Jika tegangan di C_6 lebih kecil dari tegangan di C_7 , maka C_7 menjepit tegangan di C_6 melalui D_6 dan S (gambar 6b). Bersamaan dengan itu, jika besar nilai tegangan $C_4 + C_6$ lebih kecil dari tegangan $C_5 + C_7$, maka C_5 dan C_7 menjepit tegangan di C_4 dan C_6 melalui D_4 dan S (gambar 6c). Dengan cara yang sama, C_3 , C_5 dan C_7 menjepit tegangan di C_2 , C_4 dan C_6 (gambar 6d).

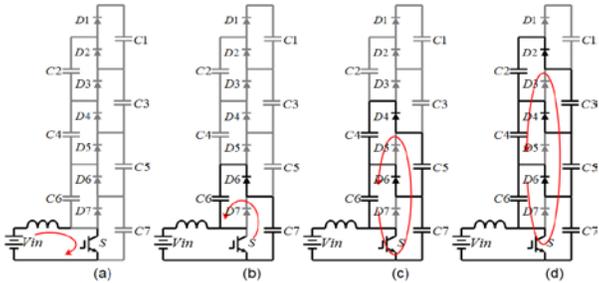
Keadaan pada saat *switch off* ditunjukkan pada gambar 7. Ketika *switch off*, arus induktor menyalakan D_7 dan itu mengakibatkan semua dioda menyala. Selama keadaan off, arus induktor menyalakan D_7 untuk men-charge C_7 (gambar 7a). Ketika D_7 menutup/menyala, C_6 dan tegangan input (V_{in}) dan tegangan induktor menjepit tegangan di C_5 dan C_7 melalui D_5 (gambar 7b). Dengan cara yang sama, tegangan induktor ditambah tegangan input (V_{in}), C_4 dan C_7 menjepit tegangan di C_3 , C_5 dan C_7 melalui D_3 . Lambat laun tegangan di C_1 , C_3 , C_5 dan C_7 dijepit oleh C_2 , C_4 , C_6 , V_{in} dan tegangan



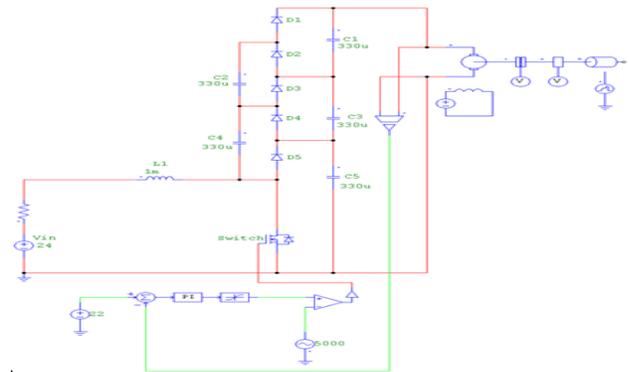
Gambar. 5. Rangkaian Konverter Boost Multilevel [4]



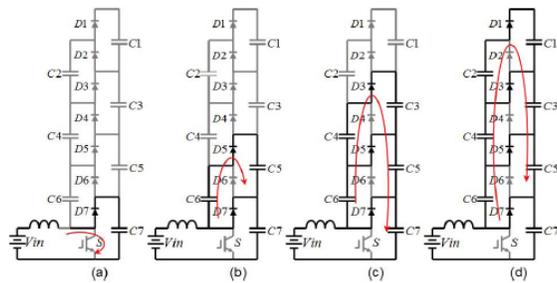
Gambar. 8. Rangkaian Keseluruhan Sistem Menggunakan Konverter Boost Dengan Dua induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan Sebagai Catu Daya Motor DC



Gambar. 6. Switch Dalam Keadaan On [5]



Gambar. 9. Rangkaian Keseluruhan Sistem Menggunakan Konverter Boost Multilevel Sebagai Catu Daya Motor DC.

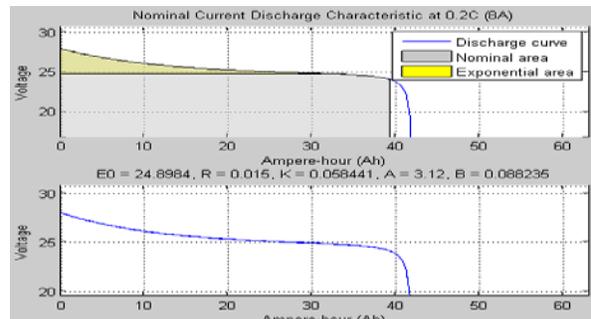


Gambar. 7. Switch Dalam Keadaan Off [5] induktor.

III. PERENCANAAN SISTEM

Desain sistem simulasi secara keseluruhan dapat dilihat pada gambar 8 dan 9. Pada gambar 8, motor dc dicatu oleh konverter boost dengan dua induktor yang dilengkapi transformator tambahan yang menggunakan dua switch untuk mengatur duty cycle. Transformator pada boost ini dianggap ideal dan bertindak sebagai autotransformator. Autotransformator membantu kedua induktor pada boost untuk menyuplai energi kepada beban. Sensor tegangan digunakan sebagai *feed back* / umpan balik kepada kontrol PI yang digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan output konverter boost yang menuju ke motor dc agar tegangan terminal motor dc tetap stabil. Hal ini dilakukan untuk menjaga kestabilan putaran motor dc.

Pada gambar 9, motor dc dicatu oleh konverter boost multilevel yang hanya menggunakan satu switch untuk mengatur duty cycle. Konverter ini mempunyai 3 tingkat / 3 level untuk memperbesar tegangan baterai. Besar nilai tegangan output ditentukan oleh banyaknya kapasitor yang *dis-cascade* pada sisi output. Oleh karena itu digunakan 3 buah kapasitor pada output konverter untuk menghasilkan tegangan



Gambar. 10. Karakteristik Discharge Baterai

output yang sesuai. Sensor tegangan digunakan sebagai *feed back* / umpan balik kepada kontrol PI yang digunakan untuk menjaga kestabilan tegangan output konverter boost yang menuju ke motor dc agar tegangan terminal motor dc tetap stabil. Hal ini dilakukan untuk menjaga kestabilan putaran motor dc.

A. Baterai

Baterai yang akan digunakan adalah 1 buah baterai jenis Lithium Ion, baterai ini dapat diisi ulang, sehingga sangat cocok digunakan pada kendaraan listrik. Selain itu baterai ini mempunyai ukuran yang lebih kecil dibandingkan dengan baterai isi ulang yang lain seperti NiCad atau baterai NiMH. Spesifikasi baterai yang dipilih disesuaikan dengan beban motor dengan daya 0,3 kW.

Dari gambar 10 dapat dilihat tegangan nominal dari baterai sebesar 24 volt dan arusnya sebesar 40 Ah. Baterai ini cukup untuk mencatu beban motor dengan daya 0,3 kW selama lebih dari satu jam.

B. Desain Konverter Boost Dengan 2 Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan

Komponen dari konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan ditentukan sesuai dengan parameter yang diperlukan dalam simulasi. Parameter yang digunakan untuk menentukan nilai-nilai komponen yang tepat antara lain:

- Frekuensi *switching* : 5 kHz
- Tegangan output : 220 V
- Tegangan input (max) : 27,84 V
- Tegangan input (min) : 23,72V
- Arus beban : 1,8 A
- Delta arus output : 10% (0,18 A)
- Delta tegangan output : 1% (2,2 V)

Dari data parameter yang ditentukan, dapat dihitung nilai-nilai dari komponen konverter boost 2 induktor yang dilengkapi dengan transformator tambahan, yaitu:

❖ *Duty cycle*

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \tag{1}$$

$$D = \frac{V_{in} - V_{out}}{-V_{out}} \tag{2}$$

Maka dapat dicari

$$D_1 = \frac{V_{in} - V_{out}}{-V_{out}} = \frac{23,72 - 220}{-220} = 0,89$$

$$D_2 = \frac{V_{in} - V_{out}}{-V_{out}} = \frac{27,84 - 220}{-220} = 0,87$$

D1 = *Duty cycle* untuk mencapai Vout 220 saat Vin 23,72 V
 D2 = *Duty cycle* untuk mencapai Vout 220 saat Vin 27,84 V

❖ Nilai induktor

$$L = \frac{V_i \cdot D}{f \cdot \Delta I} \tag{3}$$

Dimana:

- L : Induktansi Induktor (H)
- V_i : Tegangan Input (V)
- D : *Duty cycle* (%)
- f : frekuensi *switching*(Hz)
- ΔI : Ripple arus (A)

Maka dapat dicari

$$L_1 = \frac{V_{i-min} \cdot D_1}{f \cdot \Delta I} = \frac{23,72 \times 0,89}{5000 \times 0,18} = 20 \text{ mH (induktansi MIN)}$$

$$L_2 = \frac{V_{i-max} \cdot D_2}{f \cdot \Delta I} = \frac{27,84 \times 0,87}{5000 \times 0,18} = 30 \text{ mH (induktansi MAX)}$$

Maka dipilih nilai induktor sebesar 24 mH karena nilai ini berada diantara nilai induktansi minimal dan induktansi maksimal.

❖ Nilai kapasitor

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_o} \tag{4}$$

Dimana:

- C : Kapasitansi Kapasitor (F)

- I_o : Arus output (A)
- ΔV_o : Ripple tegangan (V)
- f : frekuensi (Hz)
- D : *Duty Cycle*

Maka dapat dicari

$$C_1 = \frac{I_o \cdot D_1}{f \cdot \Delta V_o} = \frac{1,8 \times 0,89}{5000 \times 2,2} = 145,64 \mu F (\text{kapasitansi MAX})$$

$$C_2 = \frac{I_o \cdot D_2}{f \cdot \Delta V_o} = \frac{1,8 \times 0,87}{5000 \times 2,2} = 142,36 \text{ mF (kapasitansi MIN)}$$

Maka dipilih kapasitor tertinggi dengan kapasitas 0,15mF. Kedua kapasitor yang ada pada rangkaian konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan bernilai sama yaitu 0,15mF.

C. Desain Konverter Boost Multilevel

- Frekuensi *switching* : 5 kHz
- Tegangan output : 220 V
- Tegangan input (max) : 27,84 V
- Tegangan input (min) : 23,75 V
- Arus beban : 1,8 A
- Delta arus output : 10% (0,18 A)
- Delta tegangan output : 1% (2,2 V)

Dari data parameter yang ditentukan, dapat dihitung nilai-nilai dari komponen konverter boost multilevel yaitu:

❖ *Duty cycle*

$$V_{out} = V_{in} \left(\frac{1}{1-D} \right) \times N \tag{5}$$

Dimana N adalah jumlah/tingkat dari boost multilevel.

$$D = \frac{(N \times V_{in}) - V_{out}}{-V_{out}} \tag{6}$$

Maka dapat dicari

$$D_1 = \frac{(N \times V_{in}) - V_{out}}{-V_{out}} = \frac{(3 \times 23,75) - 220}{-220} = 0,68$$

$$D_2 = \frac{(N \times V_{in}) - V_{out}}{-V_{out}} = \frac{(3 \times 27,84) - 220}{-220} = 0,62$$

D1 = *Duty cycle* untuk mencapai Vout 220 saat Vin 23,75 V
 D2 = *Duty cycle* untuk mencapai Vout 220 saat Vin 27,84 V

❖ Nilai induktor

$$L_{min} = \frac{R_{out} \times (1-D)^2}{2 \times N^2} \times D \times T \tag{7}$$

$$L = L_{min} \times 10 \tag{8}$$

Dimana:

- L_{min} : Induktansi Induktor Minimal (H)
- L : Induktansi Induktor (H)
- R_{out} : Resistor Output (Ω)
- D : *Duty Cycle*
- T : Periode *Switching*(Hz)
- N : Jumlah / Tingkat dari Boost Multilevel

Maka dapat dicari

$$L_{min1} = \frac{R_{out} \times (1 - D_1)^2}{2 \times N^2} \times D_1 \times T$$

$$= \frac{122,22 \times (1 - 0,68)^2}{2 \times 3^2} \times 0,68 \times \frac{1}{5000}$$

$$L_{min1} = 94,56 \mu H$$

$$L_1 = L_{\min 1} \times 10 = 94,56 \mu H \times 10 = 945,6 \mu H$$

$$L_1 = 0,95 \text{ mH (induktansi MIN)}$$

$$L_{\min 2} = \frac{R_{out} \times (1-D_2)^2}{2 \times N^2} \times D_2 \times T$$

$$= \frac{122,22 \times (1-0,62)^2}{2 \times 3^2} \times 0,62 \times \frac{1}{5000}$$

$$L_{\min 2} = 0,12 \text{ mH}$$

$$L_2 = L_{\min 2} \times 10 = 0,12 \text{ mH} \times 10 = 1,2 \text{ mH}$$

$$L_2 = 1,2 \text{ mH (induktansi MAX)}$$

Maka dipilih nilai induktor sebesar 1 mH karena nilai ini berada diantara nilai induktansi minimal dan induktansi maksimal.

❖Nilai kapasitor

$$C = \frac{I_o \cdot D}{f \cdot \Delta V_o}$$

Dimana:

- C : Kapasitansi Kapasitor (F)
- I_o : Arus output (A)
- Δv_o : Ripple tegangan (V)
- f : frekuensi (Hz)

Maka dapat dicari

$$C_1 = \frac{I_o \cdot D_1}{f \cdot \Delta V_o} = \frac{1,8 \times 0,68}{5000 \times 2,2}$$

$$C_1 = 111,3 \mu F (\text{kapasitansi MAX})$$

$$C_2 = \frac{I_o \cdot D_2}{f \cdot \Delta V_o} \times N = \frac{1,8 \times 0,62}{5000 \times 2,2}$$

$$C_1 = 101,5 \mu F (\text{kapasitansi MIN})$$

Maka dipilih nilai kapasitor dengan kapasitas 110μF karena nilai ini berada diantara nilai minimal dan nilai maksimal. Ketiga kapasitor yang ada pada rangkaian konverter boost multilevel (C₁, C₃ dan C₅) harus mempunyai nilai total 110μF. Nilai kapasitor lainnya (C₂ dan C₄) masing-masing juga bernilai sama dengan nilai kapasitor C₁, C₃ dan C₅

IV. HASIL SIMULASI DAN IMPLEMENTASI

Simulasi dilakukan dengan dua macam cara yaitu simulasi per bagian dan secara keseluruhan sistem. Selain simulasi, implementasi juga dilakukan untuk membuktikan secara nyata hasil dari simulasi. Pada tugas akhir ini dilakukan implementasi terhadap konverter boost multilevel.

A. Perbandingan Besar Nilai Efisiensi

Untuk mendapatkan besar nilai efisiensi tiap konverter, maka dilakukan simulai menggunakan software Pspice karena komponen-komponen yang digunakan tidak ideal. Tabel 1 menunjukkan besar nilai efisiensi konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan dan tabel 2 menunjukkan besar nilai efisiensi konverter boost multilevel.

Dari tabel 1 dan 2 dapat diketahui bahwa besar nilai efisiensi konverter boost multilevel lebih baik daripada besar nilai efisiensi konverter boost dengan 2 induktor tambahan yang dilengkapi transformator tambahan. Hal ini terjadi karena jumlah komponen switching pada konverter boost multilevel lebih sedikit daripada jumlah komponen switching

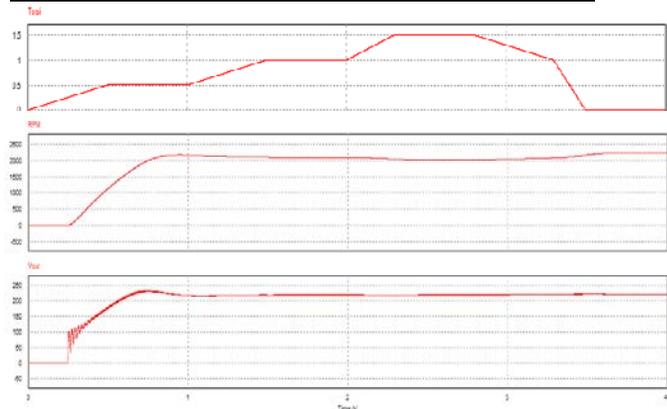
Tabel 1.
Besar Nilai Efisiensi Konverter Boost Dengan 2 Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan

R (Ω)	I _{ouput avg} (A)	P _{input} (Watt)	P _{output} (Watt)	η (%)
122.22	1,18	197,76	112,63	56,95
150	0,98	165,36	94,77	57,31
175	0,85	144,48	82,88	57,36
200	0,75	128,64	73,61	57,22
225	0,67	115,92	66,09	57
250	0,6	105,84	59,44	56,11

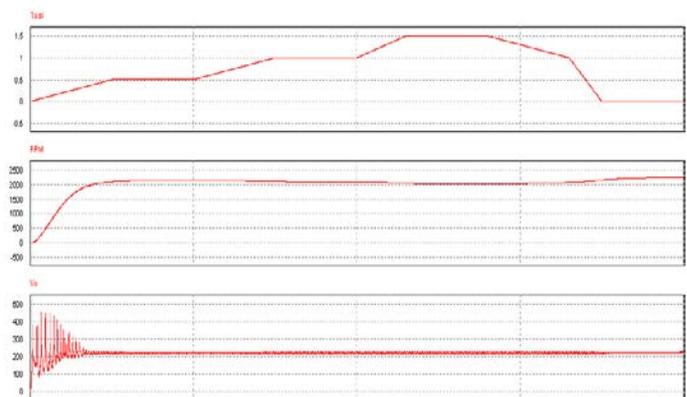
R (Ω)	I _{ouput avg} (A)	P _{input} (Watt)	P _{output} (Watt)	η (%)
275	0,55	97,68	54,75	56,05
285	0,53	94,8	52,86	55,76
290	0,525	93,36	52,41	56
295	0,52	92,16	51,95	56,37

Tabel 2.
Besar Nilai Efisiensi Konverter Boost Multilevel

R (Ω)	I _{ouput avg} (A)	P _{input} (Watt)	P _{output} (Watt)	η (%)
122.22	1,54	375,36	288,89	76,96
150	1,3	319,2	253,21	79,33
175	1,14	281,52	227,53	80,82
200	1,02	252,24	207,44	82,24
225	0,92	228,48	189,90	83,11
250	0,84	209,04	175,49	83,95
275	0,77	192,72	162,49	84,31
285	0,74	186,96	156,71	83,82
290	0,73	184,08	154,85	84,12
295	0,72	181,44	152,98	84,31



Gambar 11. Grafik Pengaruh Perubahan Torsi Pada Kecepatan dan Tegangan Terminal Motor DC Saat Motor Dicatu oleh Konverter Boost Dengan 2 Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan



Gambar 12. Grafik Pengaruh Perubahan Torsi Pada Kecepatan dan Tegangan Terminal Motor DC Saat Motor Dicatu oleh Konverter Boost Multilevel

Tabel 3.

Hasil Pengukuran, Perhitungan dan Simulasi Nilai Tegangan dan Arus Output Saat Duty Cycle = 0,5 dan R = 218 Ω

V _{dc} (V)	V _{out} Pengukuran (V)	V _{out} Teori (V)	V _{out} Simulasi (V)	I _{out} Pengukuran (A)	I _{out} Simulasi (A)
3	17,4	18	17,7	0,08	0,08
6	36,2	36	35,4	0,17	0,16
9	55,8	54	53,1	0,26	0,24
12	73,9	72	70,8	0,34	0,33
15	93,2	90	88,5	0,43	0,38
18	113,9	108	106,2	0,52	0,49
21	133	126	123,9	0,61	0,57
3	17,4	18	17,7	0,08	0,08
6	36,2	36	35,4	0,17	0,16

pada konverter boost dengan 2 induktor tambahan yang dilengkapi transformator tambahan. Semakin banyak komponen switching, maka drop tegangan akan semakin besar. Hal ini berdampak pada besar nilai efisiensi yang semakin kecil. Dimana kedua konverter ini menggunakan tipe komponen switching yang sama yaitu Mosfer IRFP460 dengan tahanan dalam 0.27 Ohm.

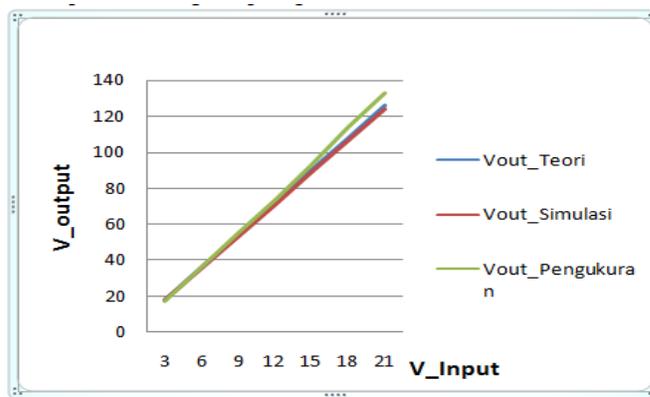
B. Simulasi Keseluruhan Sistem

Pada simulasi ini motor dc dicatu oleh konverter boost yang berfungsi untuk menaikkan tegangan baterai dan menjaga kecepatan motor tetap konstan. Gambar 11 dan gambar 12 menunjukkan pengaruh perubahan torsi pada kecepatan dan tegangan motor dc saat motor dicatu oleh konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi oleh transformator tambahan dan saat dicatu oleh konverter boost multilevel. Berdasarkan grafik diatas, dapat dianalisa bahwa saat torsi motor berubah-ubah dengan jangka waktu yang berbeda, kecepatan motor relatif stabil di kecepatan rata-rata 2100 rpm. Hal ini terjadi karena tegangan terminal motor dc relatif stabil pada nilai 220 volt. Selain itu adanya kontroler PI yang bekerja maksimal pada kedua konverter boost tersebut.

C. Perbandingan Besar Nilai Tegangan Output Secara Pengukuran, Simulasi dan Perhitungan

Setelah proses implementasi boost konverter multilevel selesai dilakukan, maka dilakukan pengukuran tegangan output saat duty cycle =0,5 dan R =218 Ω serta tegangan input dibuat berubah-ubah (3-21 volt) . Perbandingan besar nilai tegangan output dan arus output ditampilkan pada tabel 3. Sedangkan perbandingan besar nilai tegangan output secara grafik ditampilkan pada gambar 13.

Berdasarkan data pada grafik diatas, dapat dianalisa bahwa perbedaan besar tegangan output secara pengukuran, teori (perhitungan) dan simulasi, perbedaan nilainya tidak terlampau jauh. Hal ini karena saat simulasi, besar nilai komponen yang dimasukkan tidak jauh berbeda dengan nilai komponen pada rangkaian implementasi.



Gambar 13. Grafik Perbandingan Antara V_{out} Teori, V_{out} Simulasi dan V_{out} Pengukuran Saat Duty Cycle = 0,5 Dan R = 218 Ω

V. KESIMPULAN

Dari penelitian dan simulasi yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan yaitu konverter boost multilevel cocok digunakan sebagai catu daya kendaraan listrik, karena dapat menaikkan tegangan baterai dengan ratio yang tinggi pada saat memberikan catu tegangan pada motor dc dan bersama kontrol PI menjaga tegangan terminal motor dc konstan sehingga kecepatan kendaraan listrik dapat dijaga konstan pada saat torsi berubah-ubah. Selain itu besar nilai efisiensi konverter boost multilevel lebih tinggi daripada besar nilai efisiensi konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan, karena terdapat drop tegangan pada kedua saklar konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan. Pengaturan tegangan output konstan pada konverter boost multilevel juga lebih mudah dilakukan daripada pengaturan tegangan output pada konverter boost dengan 2 induktor yang dilengkapi transformator tambahan karena konverter boost multilevel hanya menggunakan satu saklar.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Hughes, Austin; 2006, "Electric Motors and Drives"; Third Edition, Great Britain, Leeds.
- [2] Miley John & Sons.; "Electric Vehicle Technology Explained"; England. 2003.
- [3] Haris P.P., Mohammad., "Desain dan Simulasi Boost Konverter dengan Dua Induktor yang Dilengkapi Transformator Tambahan Untuk Meningkatkan Efisiensi", Institute Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2003.
- [4] Rosas-Caro, J.C.; Ramirez, J.M.; Peng, F.Z.; Valderrabano, A.; "A DC-DC Multilevel Boost Converter"; IET Power Electron., Vol.3, Iss.1, pp. 129-137, 2010
- [5] Rosas-Caro, Julio C.; Ramirez, Juan M.; Garcia-Vite, Pedro Martin.; "Novel DC-DC Multilevel Boost Converter"; Power Electronics Specialist Conference, PESC 2008. IEEE 2008 Page(s):2146-2151., 2008